

Entwicklung, Simulation, Bau und Erprobung
einer submarinen Anlage zur Meerwasserentsalzung
nach dem Prinzip der Umkehrosmose

Der Technischen Fakultät
der Universität Erlangen-Nürnberg
zur Erlangung des Grades
DOKTOR - INGENIEUR

vorgelegt
von
Thomas Peters

Erlangen, 1980

Entwicklung, Simulation, Bau und Erprobung
einer submarinen Anlage zur Meerwasserentsalzung
nach dem Prinzip der Umkehrosmose

Der Technischen Fakultät
der Universität Erlangen-Nürnberg
zur Erlangung des Grades
DOKTOR - INGENIEUR

vorgelegt

von

Thomas Peters

Erlangen, 1980



Als Dissertation genehmigt von
der Technischen Fakultät
der Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 06.12.1979

Tag der Promotion: 08.02.1980

Dekan: Prof. Dr.-Ing. H. Niemann

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. R. Rautenbach

Prof. Dr. S. Peter

Meinem verehrten Lehrer

Herrn Professor Klapp

gewidmet

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Apparatetechnik und Anlagenbau der Universität Erlangen-Nürnberg.

Meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Professor Dr.-Ing. E. Klapp, Inhaber des Lehrstuhls für Apparatetechnik und Anlagenbau der Universität Erlangen-Nürnberg, der die Anregung zu dieser Arbeit gab, gilt mein besonderer Dank für sein stets förderndes Interesse, seine wertvollen Anregungen und die eingehende Betreuung und Förderung. Viel zu früh verstarb Herr Professor Klapp am 28. Juni 1979 im 46. Lebensjahr. In bewußter Kenntnis seiner schweren Krankheit hat er bis zuletzt die entstehende Arbeit betreut und den Weg für die Weiterführung der Arbeiten aufgezeigt.

Herrn Professor Dr.-Ing. R. Rautenbach, Direktor des Instituts für Verfahrenstechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen und Herrn Professor Dr. S. Peter, Inhaber des Lehrstuhls für Technische Chemie der Universität Erlangen-Nürnberg, gilt mein aufrichtiger Dank für Ihre Beratung und Anleitung, durch die die vorliegende Arbeit zum Abschluß gebracht werden konnte.

Herrn Oberingenieur a.D. B.C. Drude danke ich für seine wertvollen Anregungen und die fruchtbare Zusammenarbeit zu Beginn der Untersuchungen zu dieser Arbeit.

Herrn G. van Opbergen, Inhaber der Firma Josef van Opbergen, Neuss, gilt mein Dank für seine engagierte und persönliche Mitarbeit und Unterstützung bei der Konstruktion der Pilotanlage und bei der Durchführung der Versuche.

Teile dieser Arbeit entstanden im Rahmen von Forschungsvorhaben, die vom Bundesministerium für Forschung und Technologie, der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen und der Deutschen Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen gefördert wurden. Den Institutionen danke ich für die finanzielle Unterstützung.

Der Firma Mannesmann Anlagenbau AG, Düsseldorf, danke ich für die Möglichkeit zur Auswertung des Offshoreversuches und die Unterstützung bei der Durchführung des Projektes SUMEA.

Der Firma Fluid Systems, San Diego, sei für die Unterstützung und Bereitstellung von Versuchsmitteln gedankt.

Eine Untersuchung über eine neue Technologie kann ohne die direkte oder indirekte Mitarbeit zahlreicher Personen, Firmen und Institutionen nicht durchgeführt werden. Allen diesen möchte ich meinen Dank für ihre Hilfe und Unterstützung aussprechen.

Mein herzlicher Dank gilt den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Apparatetechnik und Anlagenbau, insbesondere Herrn B. Schult für seine vielseitige Hilfe, Frau Hubner, Herrn Lehmann und der Werkstatt, Herrn Bühner und Herrn Horlomos, durch deren tatkräftige Mitarbeit diese Arbeit letztendlich ermöglicht wurde.

Inhaltsverzeichnis

Seite

1	<u>Süßwasserbedarf und Möglichkeiten zur Deckung</u>	1
1.1	Wasserverbrauch	1
1.2	Wasserbedarfsentwicklung	2
1.3	Möglichkeiten zur Bedarfsdeckung	5
2	<u>Verfahren zur Meerwasserentsalzung</u>	8
2.1	Allgemeine Gesichtspunkte zu Meerwasserentsalzungsverfahren	8
2.2	Thermische Verfahren	11
2.2.1	Verdampfungsverfahren	11
2.2.2	Verdunstungsverfahren	12
2.2.3	Gefrierverfahren	13
2.3	Membranverfahren	14
2.3.1	Elektrodialyse	14
2.3.2	Umkehrosmose	15
2.4	Verfahrensvergleich	16
2.5	Submarine Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlage	18
2.5.1	Verfahrensmerkmale	18
2.5.2	Anlagentechnische Gesichtspunkte	19
2.5.3	Einsatzbereiche und -orte	20
3	<u>Wirtschaftlichkeitsanalyse</u>	23
3.1	Wirtschaftliche Bestimmungsgrößen für die Installation und den Betrieb von submarinen Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlagen	24
3.1.1	Haupteinflußgrößen	24
3.1.2	Abhängigkeitsmatrix	25
3.2	Aufbau einer Kostenfunktion	27
3.2.1	Zielgröße der Kostenfunktion	27
3.2.2	Kostenbereiche	27
3.2.3	Rechenprogramme	27
3.2.4	Wassergestehungskosten	30

4	<u>Konzeption submarine Umkehrosmose-</u> <u>Meerwasserentsalzungsanlagen</u>	37
4.1	Anlagenkonzepte	37
4.2	Aufbau submariner Umkehrosmose- Meerwasserentsalzungsanlagen	43
4.2.1	Süßwassergewinnung	43
4.2.1.1	Membrankörper	43
4.2.1.2	Druckbehälter	53
4.2.2	Förderung	53
4.2.2.1	Pumpe	53
4.2.2.2	Produktpipeline	55
4.2.2.3	Energieversorgungskomponenten	57
4.2.2.4	Entlüftungssystem	57
4.2.2.5	Hybridkabel	58
4.2.3	Positionierung	58
4.2.4	Küstenstation	60
4.2.5	Steuer- und Regeltechnik	60
4.2.6	Meßtechnik	60
4.3	Morphologische Analyse zum Anlagen- aufbau	60
4.4	Betrieb	62
4.5	Störfälle	63
4.6	Ausbringen der Anlage	64
5	<u>Untersuchungen und Entwicklung von Kom-</u> <u>ponenten für submarine Umkehrosmose-</u> <u>Meerwasserentsalzungsanlagen im Rahmen</u> <u>der Konzeptphase</u>	66
5.1	Untersuchungen an Komponenten	66
5.1.1	Außendruckversuch an Hydraulik-Hoch- druckschläuchen in Aachen	68
5.1.2	Außendruckversuche an Hydraulik-Hoch- druckschläuchen in Erlangen	71
5.1.3	Versuche mit Niederdruck-Schläuchen in Erlangen	74
5.2	Entwicklung von Komponenten	76
5.2.1	Modulsysteme	76
5.2.2	Submarine Multikupplung	77
5.2.3	Entgasungssystem	77

6	<u>Pilotanlage für submarine Umkehrosmose-</u> <u>Meerwasserentsalzung</u>	85
6.1	Konzeption der Pilotanlage	85
6.2	Konstruktion der Baugruppen	92
6.2.1	Produktwassergewinnungssystem	94
6.2.2	Produktwassersammler	94
6.2.3	Produktwasserfördereinheit	98
6.2.4	Rohwasserverteilersystem	102
6.2.5	Entlüftungssystem	102
6.2.6	Absensystem	104
6.2.7	Meßsystem	106
6.3	Untersuchungen an Komponenten für die Pilotanlage	114
7	<u>Versuche mit der Pilotanlage</u>	118
7.1	Ausrüstung eines Meßwagens	118
7.2	Simulationsversuche	121
7.3	Offshoreversuch	127
7.3.1	Absenkvorrichtung	127
7.3.2	Versuchsschiff	130
7.3.3	Durchführung des Offshoreversuches	133
8	<u>Ausblick</u>	153
9	<u>Zusammenfassung</u>	154
	<u>Literaturverzeichnis</u>	156

1 Süßwasserbedarf und Möglichkeiten zur Deckung

1.1 Wasserverbrauch

Der Zuwachs der Weltbevölkerung, die Erhöhung des Lebensstandards und die Steigerung der Industrialisierung sind Ursachen für den ständig steigenden Bedarf an Trink- und Brauchwasser. Aufgrund unterschiedlich großer Wachstumsraten in diesen Bereichen und bedingt durch unterschiedlichste Einflüsse in den einzelnen Ländern weisen die Mengenangaben für den durchschnittlichen Wasserverbrauch jedoch eine erhebliche Streubreite auf.

Für den kommunalen Wasserverbrauch liegen die statistischen Werte zwischen 2,5 und 1.000 Litern pro Kopf und Tag [1, 2]. Dabei ist der Wasserverbrauch in vielen Gebieten der Erde im wesentlichen eine Frage des vorhandenen Wasserangebotes und nicht des tatsächlichen Bedarfes.

Während der Wasserverbrauch in Haushalten westlicher Industrieländer zur Zeit mit 150 Litern pro Kopf und Tag angenommen werden kann [3, 4], beträgt der Pro-Kopf-Verbrauch in der Mehrzahl der Entwicklungsländer nur 10 Liter am Tag [5]. Zwangsläufig wird dieser Wert in ariden und semiariden Zonen teilweise noch unterschritten und erreicht mit 2 bis 4 Litern nahezu die Grenze für die Aufrechterhaltung menschlichen Lebens [6].

Steht in den ariden Zonen aufgrund der finanziellen Gesamtsituation eines Landes genügend Wasser zur Verfügung, so kann der kommunale Wasserverbrauch Werte von ca. 450 Litern pro Kopf und Tag erreichen, wie in Kuwait und Bahrain [7].

Diese erheblichen Unterschiede verdeutlichen die mit zunehmendem Lebensstandard, städtebaulicher Entwicklung

und industriellem Aufbau bzw. Ausbau zu erwartende Steigerung des Wasserverbrauches für viele Gebiete der Erde.

1.2 Wasserbedarfsentwicklung

Angaben und längerfristige Prognosen über die Wasserbedarfsentwicklung sind teilweise mit erheblichen Widersprüchen behaftet, wie die folgenden Beispiele zeigen;

- a) Unter Heranziehung statistischer Werte für die Zunahme von Weltbevölkerung, Urbanisierung und Industrialisierung wird angenommen [8], daß der Wasserbedarf jährlich um durchschnittlich 4 bis 5 % wachsen wird, was etwa einer Verdoppelung des Bedarfes alle 12 bis 15 Jahre entspricht. Diese Tendenz wird in Bild 1.1 [9] durch den Verlauf der errechneten Wasserbedarfsentwicklung für Jeddah in Saudi Arabien bestätigt. Sie wird in Bild 1.2 [10] durch die Erweiterung der Verdampferanlagen-Kapazität in einigen Golfstaaten belegt, wo die zur Deckung des Wasserbedarfes benötigten Mengen nur durch Gewinnung von Süßwasser aus Meerwasser bereitgestellt werden können [11].
- b) Wasserbedarfsanalysen, die vom bisherigen Anstieg des Wasserverbrauches ausgehen, prognostizieren demgegenüber für den Wasserbedarf eine Steigerungsrate von 20 bis 30 % alle 10 Jahre [4, 12].
- c) Gestützt auf Prognosen, die insbesondere den Bedarf für die Bewässerung zusätzlich erforderlicher landwirtschaftlicher Nutzflächen berücksichtigen, wird eine Zunahme des Süßwasserbedarfes in den Industriestaaten in den nächsten 10 Jahren um 50 % und für den gleichen Zeitraum für die Entwicklungsländer um 500 % vorausgesagt [13, 14].

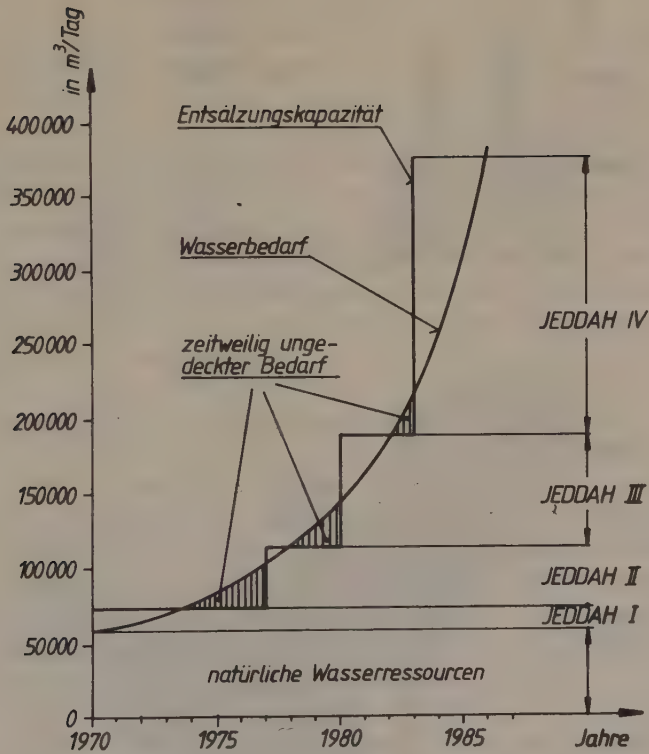


Bild 1.1: Entsälzungskapazität/Trinkwasserbedarfsverhältnis in Jeddah in Saudi-Arabien
(Jeddah I bis IV: MSF-Anlagen verschiedener Hersteller)

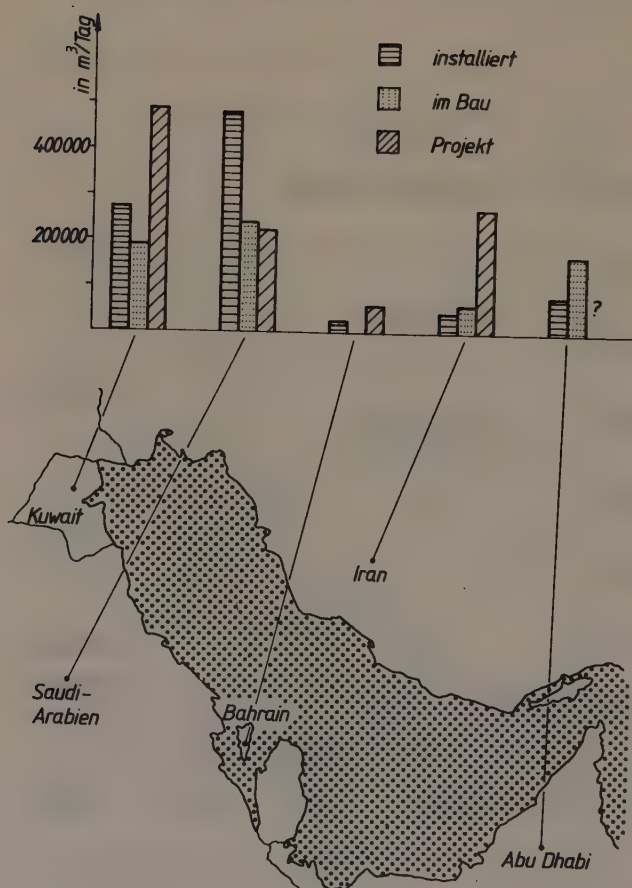


Bild 1.2: Entsalzungskapazität bei Verdampferanlagen zur Gewinnung von Süßwasser aus Meerwasser in einigen Golfstaaten - Stand 1977

Trotz der Verschiedenheit der prognostizierten Werte für die zukünftige Wasserbedarfsentwicklung wird insgesamt die Tendenz verdeutlicht, daß der Wasserbedarf exponentiell steigen wird. Diese Tendenz entspricht der Entwicklung, daß eine steigende Prosperität ein Hochpendeln von Produktivität und von Konsum bewirkt [6, 7]. Beides führt zu einer verstärkten Inanspruchnahme der Ressourcen. Auf der Konsumseite zeigt sich das durch den lebensstandardabhängig steigenden Trinkwasserbedarf in den Haushalten, wobei ein großer Teil eines hohen Wasserverbrauches der Wasserverschwendung zuzurechnen ist. Auf der Produktionsseite kommt dies durch den steigenden Industrier Wasserverbrauch und den bei der erhöhten Energiebereitstellung notwendigen zusätzlichen Kühlwasserverbrauch zum Ausdruck.

1.3 Möglichkeiten zur Bedarfsdeckung

Der wachsende Wasserbedarf kann in naher Zukunft nicht mehr aus natürlichen Wasserreserven und durch konventionelle Wassergewinnungs- und Aufbereitungsverfahren abgedeckt werden. Deshalb müssen verstärkt Trennverfahren zur Trink- und Brauchwassergewinnung aus verunreinigten und salzhaltigen Wässern zum Einsatz kommen [5, 6, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 7].

Durch den Einsatz von Trennverfahren bei der Aufbereitung von Abwässern der verschiedensten Arten können die Inhaltsstoffe des Abwassers abgetrennt und das Frischwasser dem Verbraucher wieder zugeführt werden. Dieses Recycling würde den Wasserverbrauch reduzieren und gleichzeitig einen Teil der Abwasserprobleme mit ihren Folgeerscheinungen verhindern. Weitaus bedeutender und vielfältiger anwendbar erscheint jedoch der Einsatz von Trennverfahren bei der Gewinnung von Süßwasser aus Meer- oder Brackwasser, das in unbegrenzten Mengen zur Verfügung

steht. Die Gesamtvorräte und die prozentualen Anteile des Wassers in seinen Erscheinungsformen an der gesamten Wassermenge der Erde zeigt Tabelle 1.1 [20].

Erscheinungsform	Menge (Kubikkilo- meter)	Anteil an der Gesamtmenge (Prozent)
Oberflächenwasser		
Süßwasserseen	125 000	0,009
Salzseen und Binnenmeere	104 000	0,008
Flüsse und Ströme	1 000	0,0001
	230 000	0,017
Grundwasser		
Bodenfeuchtigkeit	67 000	0,005
Grundwasser (bis 800 m)	4 170 000	0,31
Grundwasser (tiefer als 800 m)	4 170 000	0,31
	8 407 000	0,625
Eiskappen und Gletscher	29 190 000	2,15
Atmosphäre	13 000	0,001
Ozeane	1 321 890 000	97,2
Insgesamt (angenähert)	1 360 000 000	100

Tabelle 1.1: Der Wasservorrat der Erde

Da die natürlichen Vorkommen an Frischwasser unverändert bleiben bzw. aus unterschiedlichen Gründen ~~eher abnehmen~~ [15], ist die Gewinnung von Süßwasser aus Salzwasser die einzige Möglichkeit zur großtechnischen Ergänzung und Substitution fehlender natürlicher Vorräte an Frischwasser. Der Beginn dieser Entwicklung ist durch die Tatsache dokumentiert, daß gegenwärtig in Anlagen nach verschiedenen Wirkprinzipien weltweit täglich rund 4 Mio m³

Süßwasser aus Meer- oder Brackwasser erzeugt werden. Gemessen am Bedarf ist diese derzeitige Gesamt-Entsalzungskapazität verhältnismäßig gering, doch wird für 1985 mit einer installierten Kapazität von etwa 15 Mio m³ pro Tag gerechnet, für das Jahr 2000 mit über 400 Mio m³ pro Tag [21]. Dieser für die Errichtung neuer Entsalzungsanlagen prognostizierte exponentielle Trend steht im Einklang mit Schätzungen des amerikanischen "Office of Water Research and Technology (OWRT)", das für die nähere Zukunft mit einer Verdoppelung der weltweit installierten Entsalzungskapazität nach jeweils etwa 3 Jahren rechnet [14].

2 Verfahren zur Meerwasserentsalzung

2.1 Allgemeine Gesichtspunkte zu Meerwasserentsalzungsverfahren

Für die Gewinnung von Süßwasser aus Meerwasser eignet sich eine Reihe von Trennverfahren, die sich jedoch hinsichtlich des spezifischen Energie- und Investitionsbedarfes erheblich unterscheiden. Eine Verfahrensauswahl für die großtechnische Süßwassergewinnung wird sich dabei primär nach der Forderung richten, daß das Süßwasser in großen Mengen und möglichst billig produziert werden muß.

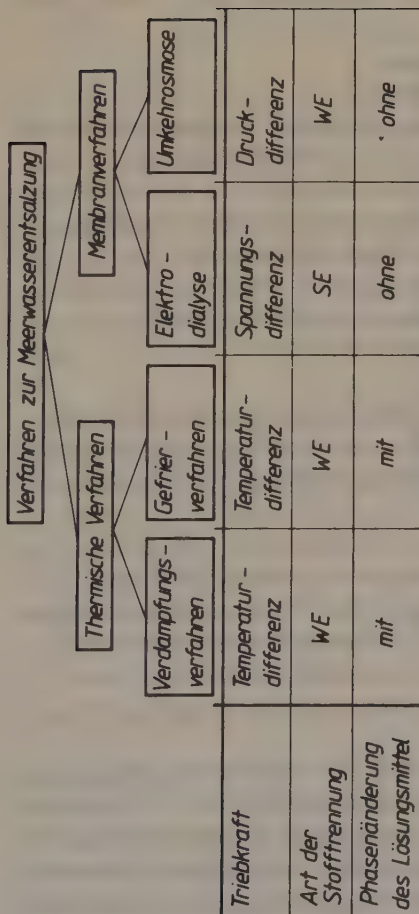
Die Erzeugung von Süßwasser aus Salzwasser ist verfahrenstechnisch als Stofftrennung anzusehen.

Die Entsalzungsverfahren lassen sich unterteilen in:

- Prozesse, bei denen die gelösten Stoffe (Salze) aus der Lösung entfernt werden;
- Prozesse, bei denen das Lösungsmittel (Wasser) aus der Lösung entfernt wird.

Zu den Prozessen der ersten Gruppe gehören z.B. Elektrodialyse und Ionenaustausch, zur zweiten Verdampfungs- und Gefrierverfahren, Ultrafiltration und Umkehrosmose.

Als weiteres Unterscheidungsmerkmal für diese Trennverfahren kann die Art der benötigten Energie (wahlweise Wärme- oder elektrische Energie) herangezogen werden, ferner die Unterscheidung nach Verfahren, die mit oder ohne Phasenwechsel des Lösungsmittels Wasser ablaufen. Die Zuordnung dieser Kriterien zu den wichtigsten Meerwasserentsalzungsverfahren ist in Bild 2.1 [22] dargestellt.



WE=Entfernung des Lösungsmittels (Wasser) aus der Lösung
SE=Entfernung der gelösten Stoffe (Salze) aus der Lösung

Bild 2.1: Verfahren zur Meerwasserentsalzung

Jede der genannten Methoden zur Meerwasserentsalzung ist nur für mehr oder weniger spezifische Anwendungsgebiete geeignet. Bei der Auswahl eines Systems für einen bestimmten Standort müssen deshalb eine Reihe von Faktoren berücksichtigt werden, wie z.B.:

- Salzgehalt des Rohwassers,
- Temperatur des Rohwassers,
- Art und Menge von Verunreinigungen im Rohwasser,
- erforderliche Süßwassermengen pro Zeiteinheit,
- Anforderungen an das Produktwasser,
- Art und Menge der zur Verfügung stehenden Energie,
- Versorgungs- und Entsorgungsmöglichkeiten,
- Dauerbetrieb oder gelegentlicher Betrieb,
- Brennstoff- und Baukosten am Aufstellungsort,
- Personalsituation am Aufstellungsort.

Besonderer Beachtung bedürfen bei der Auswahl eines Verfahrens weiterhin zwei Eigenschaften des Salzwassers, die den Betrieb von Entsalzungsanlagen entscheidend beeinträchtigen können:

- a) Salzwasser höherer Temperatur ist sehr korrosiv, so daß bei der Werkstoffauswahl, bei der konstruktiven Gestaltung und bei der Aufbereitung des Rohwassers Maßnahmen zur Verhinderung bzw. Verminderung von Korrosion zwingend notwendig sind.
- b) Die im Salzwasser gelösten Stoffe beginnen bei der Aufkonzentration und Temperaturerhöhung teilweise auszufallen und können dicke, harte Krusten bilden, die den Wärmeübergang beeinträchtigen oder auf Membranen einen Belag bilden, der den Durchsatz zunehmend verringert. Eine chemische Vorbehandlung des Rohwassers ist deshalb erforderlich. Durch konstruktive Maßnahmen kann die Inkrustationsgefahr vermindert werden.

Kriterien, nach denen die Verfahren vergleichend beurteilt werden können, sind:

- Anlagen- bzw. Investitionskosten,
- Energieverbrauch und
- Betriebs- und sonstige Unterhaltungskosten,

die sich letztlich in den Wassergestehungskosten niederschlagen. Gleichzeitig ist jedoch zu beachten, daß bei jedem Verfahren eine Verbesserung der Energiebilanz mit einer Erhöhung der Anlagenkosten verknüpft ist und nur innerhalb bestimmter Grenzen zu günstigeren Wassergestehungskosten führt. Auch deshalb ist beim Bau von Entsalzungsanlagen in jedem einzelnen Fall zu entscheiden, ob eine Investitions- oder Betriebskostenoptimierung angestrebt wird.

Bei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen ist weiterhin in die Überlegungen einzubeziehen, wie der Energieaufwand und damit die Kosten bei den einzelnen Verfahren vom Salzgehalt im Rohwasser abhängen. So besteht z.B. bei den Verdampfungs- und Gefrierverfahren in erster Näherung keine Abhängigkeit vom Salzgehalt, während bei den anderen Verfahren der Energieaufwand eine Funktion des Salzgehaltes ist [23 bis 25].

2.2 Thermische Verfahren

2.2.1 Verdampfungsverfahren

Bei den Verfahren nach diesem Prinzip wird durch Zuführung von Wärmeenergie und eine anschließende stufenweise Entspannung des erwärmten Salzwassers Wasserdampf erzeugt, der in Wärmetauschern kondensiert und als Destillat abgezogen wird. Der an den Kühlrohren kondensierende Dampf gibt dabei seine Kondensationswärme

zur Aufheizung an das frisch zugeführte bzw. das teilweise im Kreislauf zirkulierende Salzwasser ab.

Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens wird hauptsächlich durch die pro Einheit Wärmemenge dem Salzwasser entzogene Süßwassermenge bestimmt, wobei jedoch ein sinkender spezifischer Energiebedarf im allgemeinen steigende Anlagenkosten bedingt. Die meisten der heute in Betrieb befindlichen Verdampfungsanlagen erzeugen zwischen acht und zwölf Tonnen Süßwasser pro eingesetzte Tonne Heizdampf.

Aus der Vielzahl der bisher entwickelten Verdampfungsverfahren nach verschiedenen Wirkprinzipien seien die wichtigsten Varianten angeführt:

- a) Mehrstufen-Entspannungsverdampfung (MSF, Abkürzung für: Multi Stage Flash Evaporation);
- b) Mehrstufen-Longrohrverdampfung (LTV, Abkürzung für: Long Tube Vertical Evaporation);
- c) Brüdenkompressions-Verdampfung (VC, Abkürzung für: Vapor Compression Evaporation).

Während in den letzten Jahren die durchschnittlichen Blockleistungen bei 20 000 m³/d lagen, wird die z.Zt. größte realisierte Blockleistung mit 40 000 m³/d angegeben. Für die Zukunft werden bei Großanlagen Blockleistungen von 50 000 m³/d erwartet [11, 13 bis 15, 21, 23, 24_7].

2.2.2 Verdunstungsverfahren

Die Nutzung der Sonnenenergie zur Süßwassererzeugung wird in kleinerem Rahmen schon seit Jahrzehnten in ariden

und semiariden Zonen der Welt praktiziert. In einer mit Glas oder einer durchsichtigen Folie überdeckten Wanne wird Salzwasser durch die Absorption eingestrahelter Sonnenenergie verdunstet. Der entstandene Wasserdampf kondensiert an der Innenfläche der Überdachung und wird über Sammelrinnen abgezogen. Bei neueren Entwicklungen werden Absorbersysteme mit Heat-Pipes und Wärmeträgerkreisläufe eingesetzt [26], die eine Steigerung der spezifischen Süßwasserproduktion ermöglichen.

Diese Verfahren eignen sich besonders für Gebiete, in denen keine sonstigen Energiequellen zur Verfügung stehen. Sie sind einfach und überschaubar, bedürfen keiner ausgebildeten Fachkräfte für Wartung und Reparatur und ermöglichen in relativ großem Umfang eine Anlagenherstellung im Standortland. Den Vorteilen stehen jedoch eine Reihe von Nachteilen gegenüber, wie z.B. hohe spezifische Investitionskosten und eine systembedingte geringe Produktion von Süßwasser [27, 28].

2.2.3 Gefrierverfahren

Beim Abkühlen des Salzwassers auf Temperaturen unter den Gefrierpunkt bilden sich in der Lösung Süßwasserkristalle. Diese werden von der Mutterlauge abgetrennt, durch Spülung mit salzfreiem Wasser von den anhaftenden Salzresten befreit und aufgeschmolzen.

Vorteilhaft sind bei den Gefrierverfahren die sehr geringe Korrosion durch die tiefen Temperaturen, ferner das Fehlen von Inkrustationen und der relativ geringe Energiebedarf für den Phasenwechsel. Nachteilig sind die Kompliziertheit der Prozeßführung und die nicht endgültig gelösten Probleme bei der Abtrennung der Kristalle aus der Sole sowie der Einschluß von Mutterlauge in die Süßwasserkristalle

bei der Kristallisation. Technische Bedeutung haben diese Verfahren bisher nicht erlangt [13, 14, 29, 30].

2.3 Membranverfahren

Während bei den Verdampfungs- und Gefrierverfahren der Entsalzungsprozess mit einem Phasenwechsel des Lösungsmittels Wasser verbunden ist, beruhen Membranverfahren wie Elektrodialyse und Umkehrosmose auf der Wanderung der gelösten Ionen bzw. der Wassermoleküle durch semipermeable Membranen.

Gegenüber den thermischen Entsalzungsverfahren weisen die Membranverfahren deshalb eine Reihe prozeß- und anlagenspezifischer Besonderheiten auf, die in mehrfacher Hinsicht als vorteilhaft angesehen werden können; die wichtigsten sind:

- a) Die Stofftrennung kann bei Umgebungstemperatur durchgeführt werden;
- b) die rückfließende Sole stellt keine thermische Belastung für die Umwelt dar;
- c) Anlagen dieser Art sind nicht zwangsläufig an das Vorhandensein thermischer Energie gebunden. Daraus lassen sich Vorteile hinsichtlich Regelfähigkeit, Standortwahl und elastischer Bedarfsanpassung gegenüber thermischen Entsalzungsverfahren ableiten.

2.3.1 Elektrodialyse

Bestimmte Arten von semipermeablen Membranen lassen unter der Einwirkung eines elektrischen Feldes nur positive, andere nur negative Ionen durchtreten. Dieser Effekt läßt

sich zur Entfernung gelöster Salze aus Salzwässern benutzen. Zu diesem Zweck werden aus solchen Membranen z.B. flache Zellen gebildet, deren eine Wand nur Anionen, die andere nur Kationen passieren läßt, wenn eine elektrische Gleichspannung quer zu den Zellwänden angelegt wird. In den geradzahligen Zellen wird dann der Salzgehalt erniedrigt, in den ungeradzahligen angereichert.

Elektrodialyse-Anlagen erfordern besonders sorgfältige Aufbereitung des Rohwassers und aufmerksame Bedienung. Der Energiebedarf des Verfahrens ist direkt abhängig von der Salzkonzentration im Rohwasser, weshalb das Verfahren vorwiegend für die Entsalzung von Brackwasser eingesetzt wird [31]. Durch Erhöhung der Betriebstemperatur soll jedoch die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens gesteigert werden können und dieses damit für die Meerwasserentsalzung anwendbar sein [32].

2.3.2 Umkehrosmose

Beim Verfahren der Umkehrosmose werden semipermeable Membranen eingesetzt, die für das Lösungsmittel Wasser, nicht aber für die darin gelösten Stoffe durchlässig sind. Die salzhaltige Lösung wird unter hohem Druck gegen die entsprechend eingespannten, druckfesten Membranen gepreßt. Dabei permeiert das Wasser durch die Membranen und die zurückgehaltenen Salze und sonstige gelösten Stoffe reichern sich in der verbleibenden Lösung an.

Das Verfahren ist verhältnismäßig unkompliziert und läuft bei Umgebungstemperatur ab. Im Verhältnis zum apparativen Aufwand anderer Verfahren sind Umkehrosmose-Anlagen einfach im Aufbau und können bei Verwendung der entsprechenden Membranen für die unterschiedlichsten Stofftrennprobleme eingesetzt werden [33 bis 45]. Bedingt

durch die Abhängigkeit des osmotischen Druckes vom Salzgehalt einer Lösung [46] steigt die für einen Stofftrennprozeß durch Umkehrosmose aufzuwendende Energie mit dem Salzgehalt des zu behandelnden Salzwassers an. Vergleichsweise ist der Energiebedarf bei der Umkehrosmose jedoch als gering anzusehen [47 bis 49]. Wie bei anderen Verfahren ist eine Vorbehandlung des Rohwassers erforderlich, die sich primär nach dem Verschmutzungsgrad des einzuspeisenden Rohwassers und sekundär nach dem eingesetzten Modulsystem und dem verwendeten Membranwerkstoff richtet.

Bedingt durch die gegenwärtige und die für die Zukunft noch zu erwartende Verbesserung der Membraneigenschaften und die sich entwicklungsbedingt ergebenden Möglichkeiten zur Optimierung des Gesamtprozesses erweitern sich das Anwendungsspektrum und die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zunehmend.

2.4 Verfahrensvergleich

Für die Gewinnung von Süßwasser aus salzhaltigem Wasser können im Prinzip sämtliche der oben erläuterten Verfahren eingesetzt werden. Für sämtliche Verfahren sind dabei folgende Gesichtspunkte zu beachten:

- a) wichtig ist das Fernhalten aller Stoffe im Rohwasser, die Ablagerungen verursachen können, wie z.B. Schwebeteilchen, Algen oder Muscheln. Die Forderung nach Reinheit des Rohwassers bedingt einen erheblichen Aufwand für Einlaufwerke, Filter und chemische Vorbehandlung, insbesondere im Küstenbereich;
- b) da bei der Meerwasserentsalzung verfahrensbedingt nur ein Teil der Rohwassermenge als Produkt entzogen werden kann, muß die aufkonzentrierte Sole beseitigt werden.

Damit wird die "Rohstoffquelle Meer" gleichzeitig "Depo-
nie für die Produktionsrückstände", wobei aus ökologi-
schen Gründen Auslaufwerke und ähnliche Einrichtungen
für eine sorgfältige und großflächige Verteilung der
Sole an geeigneten Stellen vor der Küste vorgesehen
werden müssen;

- c) es muß ein Mehrfaches der gewünschten Produktmenge in
einen für den Entsalzungsprozeß geeigneten Energiezu-
stand gebracht werden. Zwar kann ein Teil der aufge-
brachten Energie zurückgewonnen werden, erhebliche
Energieverluste sind aber nicht vermeidbar.

Trotz dieser vergleichbaren Anforderungen oder Verhält-
nisse ergibt ein kritischer Vergleich der verschiedenen Ver-
fahren für das Verfahren der Umkehrosmose offensichtlich
folgende Vorteile:

- a) geringerer Energiebedarf als diese mit Ausnahme der
Verdampferanlagen, die in Verbindung mit Kraftwerken
an Stelle des Kondensators im Rankine Prozeß einge-
setzt werden;
- b) die Umkehrosmose benötigt zwar hochwertige elektrische
Energie, der spezifische Verbrauch ist aber selbst un-
ter Berücksichtigung des Kraftwerkswirkungsgrades ge-
ringer als bei thermischen Verfahren üblicher Qualität;
- c) durch die niedrige Betriebstemperatur ist die Gefahr
von Inkrustationen geringer;
- d) die Ansprüche an die benutzten Werkstoffe sind geringer;
- e) größere Flexibilität hinsichtlich der mengenmäßigen
Anpassung an den Bedarf;

- f) größere Flexibilität hinsichtlich des Standortes;
- g) es kann mit einer vereinfachten Montage der Anlagen und einem verhältnismäßig unkomplizierten Betrieb gerechnet werden;
- h) im Vergleich zu den anderen Verfahren sind bei der Umkehrosmose geringere spezifische Investitionskosten zu erwarten.

Diese prozeß- und anlagenspezifischen Besonderheiten sprechen bei vielen Anwendungsfällen für das Verfahren der Umkehrosmose und rechtfertigen die Anstrengungen auf dem Gebiet der Membranentwicklung und der zugehörigen Anlagentechnik.

2.5 Submarine Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlage

Eine Variante der Umkehrosmose-Anlagen, die an einer Reihe von Standorten Vorzüge haben dürfte, ist die submarine Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlage.

2.5.1 Verfahrensmerkmale

Das Konzept einer submarinen, d.h. unter dem Meeresspiegel angeordneten Anlage, beruht auf folgender Funktionsweise:

Der hydrostatische Druck des Meerwassers in größeren Tiefen dient als Energiequelle für das Aufbringen des zur Entsalzung benötigten Betriebsdruckes auf der Rohwasserseite. Ein hinter den Membranen angeordneter Druckbehälter, in dem etwa Atmosphärendruck aufrechterhalten wird, schafft die an den Membranen zur Entsalzung erforderliche Druckdifferenz. Dieser Druckbehälter ist gleichzeitig Sammelbehälter für das permeierende Süßwasser, das von einer dort installierten Pumpe zur Wasserübernahme-Station an der Meeresoberfläche oder

ans Festland gepumpt wird. Unter "größeren Meerestiefen" wird dabei die Spanne von 500 bis 1 000 m verstanden. Dort herrschen die für den Membranprozeß der Umkehrosmose benötigten Drücke von 50 bis 100 bar.

2.5.2 Anlagentechnische Gesichtspunkte

Gegenüber Landanlagen nach dem Prinzip der Umkehrosmose ergibt die Anordnung in größeren Meerestiefen folgende Vorteile:

- Die erforderliche Energie muß nur auf der Produktseite aufgewendet werden und beschränkt sich auf die Förderung des gewonnenen Süßwassers sowie gegebenenfalls den Energiebedarf für die Zwangsanströmung der Membranen durch Meerwasser in Kompaktmodulen. Dem einsatztiefen- und pumpenwirkungsgradabhängigen Energiebedarf zwischen circa 2 und maximal etwa 5 kWh/m^3 produziertes Süßwasser bei submarinen Anlagen, der annäherungsweise nur bei Landanlagen mit Energierückgewinnung und einem sehr hohen Turbinen- und Pumpenwirkungsgrad erreicht werden könnte, stehen Werte zwischen 13 und 15 kWh/m^3 für Landanlagen üblicher Bauart gegenüber.
- Als Rohwasser steht Tiefenwasser zur Verfügung, das im Regelfall frei von Verunreinigungen ist $\angle 50$ bis $52 \text{ } \mu\text{g/l}$.

Abgesehen von einer mechanischen Grobabscheidung werden daher weitere Aufbereitungsstufen voraussichtlich entfallen können.

- Es gibt keine räumlichen Beschränkungen im Vergleich zu den Gegebenheiten an Land.

- Vom Prinzip der Umkehrosmose her nicht grundsätzlich notwendige, bei Landanlagen aus anlagentechnischen Gründen aber zwingend erforderliche Anlagenbestandteile wie Ein- und Auslaufwerk entfallen bei submariner Anordnung.

Nur angedeutet seien Vorteile, die sich für die Bereiche Ökologie, Siedlungswirtschaft und Anlagenschutz ergeben.

2.5.3 Einsatzbereiche und -orte

Begrenzt durch die prozeßbedingte Einsatztiefe können submarine Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlagen grundsätzlich in zwei Bereichen eingesetzt werden:

- a) In Küstengebieten, sei es Festland oder Insel, wo die erforderliche Einsatztiefe in einem relativ geringem Abstand vom Meeresufer vorhanden ist. Für die im folgenden angestellten Überlegungen wurde ein maximaler Abstand von 10 km angenommen;
- b) für Produktionsanlagen auf hoher See, die im Zusammenhang mit der marinen Rohstoffgewinnung zu sehen sind. Neben der Trink- und Brauchwassererzeugung ist z.B. die Verwendung des produzierten Süßwassers für die hydrometallurgische Aufbereitung von Erzen und Erzschlämmen zwecks Reduzierung des Transportvolumens denkbar.

Der zweitgenannte Einsatzbereich ist in allen Ozeanen und nahezu allen sog. Nebenmeeren in einer mittleren Entfernung von der Küste von ca. 70 km gegeben. Der an erster Stelle genannte findet sich bei fast allen Inseln und Inselgruppen, jedoch nur an einem Teil der Festlandsküsten. In Bild 2.2 sind solche Steilküstenbereiche eingetragen, in denen in bis zu 10 km Entfernung vor der Küste Meerestiefen zwischen 500 und 1 000 m erreicht werden. Gleichzeitig

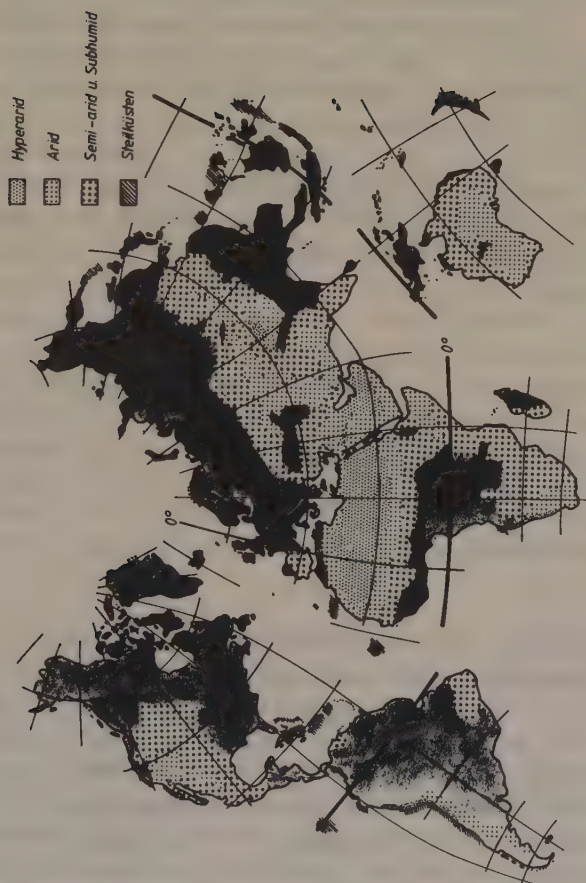


Bild 2.2: Verteilung von Steilküsten und ariden Gebieten

sind die ariden Zonen der Erde gekennzeichnet [53]. Dem Bild ist zu entnehmen, daß Steilküsten in der Mehrzahl der Fälle ariden Zonen im Küstenbereich vorgelagert sind. Somit liegen die Einsatzbereiche in Wasserbedarfszonen. Die Ergebnisse der "United Nations conference on desertification" 1977 in Nairobi zeigen weiterhin, daß ein Großteil gerade dieser Küstengebiete durch zunehmende Wüstenbildung (Versteppung) bedroht sind [53].

In Tabelle 2.1 sind mögliche Einsatzorte genannt, wobei es sich ebenso um aride Küstenzonen wie um Inseln ohne bzw. ohne ausreichende eigene Wasserversorgung handelt:

Ort	Meerestiefe	Entfernung von der Küste
Lipari (Sizilien)	725 m	2,8 km
Elat (Israel)	667 m	3,2 km
Lanzarote (Kanarische Ins.)	800 m	5,3 km
Guantanamo (Cuba)	880 m	2,1 km
Foca (Süd-Italien)	500 m	3,3 km
Las Palmas (Kanarische Ins.)	1.710 m	7,9 km
Bermudas	560 m	3,6 km
Nassau	732 m	4,0 km
St. Croix (Virgin Isl.)	800 m	4,5 km
Valparaiso (Chile)	700 m	6,0 km

Tabelle 2.1: Beispiele für Meerestiefen und ihre Entfernung von der Küste

Wirtschaftlichkeitsanalyse

Ein neues Verfahren wird nur dann aus dem Bereich der theoretischen Betrachtungen und Laborentwicklungen in den Bereich der technischen Realisierung übernommen werden können, wenn neben den technologischen Vorteilen besonders auch die wirtschaftlichen Aspekte einem entsprechenden Vergleich mit konkurrierenden Verfahren standhalten. Bezüglich der submarinen Entsalzungstechnik und der anderen Verfahren zur Meerwasserentsalzung werden hierfür vorzugsweise die spezifischen Investitionskosten und die Wassergestehungskosten [54] unter besonderer Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten herangezogen werden müssen, da wegen der Unterschiedlichkeit der Entsalzungsverfahren und der ihre Wirtschaftlichkeit beeinflussenden Größen schwerlich andere Vergleichsmaßstäbe zu finden sein dürften. Doch auch die Bindung an den Wasserpreis entfällt, wenn die Sicherung eines bestimmten Süßwasserdeputats für die Aufrechterhaltung menschlichen Lebens zwingend erforderlich ist, da dann die verfügbare Energieart und die Flexibilität eines Verfahrens hinsichtlich Standort und Anlagengröße von größerer Bedeutung ist [55].

Andererseits ist die Heranziehung der Wassergestehungskosten als Vergleichsmaßstab bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Verfahren nur dann sinnvoll, wenn bei den Berechnungen von vergleichbaren Größenordnungen und Werten ausgegangen wird. Literaturrecherchen ergaben zum Beispiel, daß bei Parameterstudien über Anlagen gleichen Wirkprinzips unterschiedliche Werte für die gleichen Einflußgrößen eingesetzt, und daß die Berechnungsgrenzen für die Anlage jeweils anders gelegt wurden [56].

Bezüglich der einzusetzenden Werte ist bei den derzeitigen Kostensteigerungen davon auszugehen, daß Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und Vergleiche nur dann aktuell sind, wenn die verwendeten Angaben für Preise und Kosten nicht älter als zwei Jahre sind [57].

Bei der im folgenden erläuterten Kostenberechnung für submarine Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlagen wurden obige Überlegungen berücksichtigt.

3.1 Wirtschaftliche Bestimmungsgrößen für die Installation und den Betrieb von submarinen Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlagen

3.1.1 Haupteinflußgrößen

Bei der Auslegung und Berechnung einer submarinen Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlage müssen folgende Haupteinflußgrößen berücksichtigt werden:

Fördermenge	VP
Einsatztiefe	T
Einsatzortentfernung	L
Strömungsgeschwindigkeit vor Ort	W
Wassertemperatur vor Ort	TEMP

Die Einsatztiefe T, in ihren Grenzen bestimmt durch die prozeßbedingten Drücke von 50 bis 100 bar entsprechend einer Tiefe von ca. 500 bis 1 000 m, ist die senkrechte Entfernung von der Meeresoberfläche zur abgesenkten Anlage.

Unter Einsatzortentfernung L wird die direkte horizontale Entfernung zwischen der Küstenstation und dem Einsatzort der Anlage verstanden.

Als weiterer Parameter wird die sog. Leitungslänge LL eingeführt, die insbesondere bei der Kostenberechnung für Kabel und Rohrleitung eingeht. LL ist eine Funktion von L und T und wird berechnet als

$$LL = C \cdot \sqrt{(L^2 + T^2)} .$$

Der Multiplikator $C = 1,27$ setzt sich zusammen aus 20 % Aufschlag zur errechneten Hypothenusenlänge, um eine Angleichung der Trasse auf dem Meeresboden zu simulieren, und 7 % freie Länge, die üblicherweise für die spannungsfreie Verlegung der Leitungen eingesetzt wird [58].

3.1.2 Abhängigkeitsmatrix

Die Verknüpfung zwischen diesen Haupteinflußgrößen und den Funktionsbereichen nach Abschnitt 4.3 ist in der folgenden Abhängigkeitsmatrix dargestellt, wobei alle Kostenbereiche nach Abschnitt 3.2.2 berücksichtigt wurden.

	VP	T	L	W	TEMP
Süßwassergewinnung	+	+		+	+
Förderung	+	+	+		
Positionierung	+	+	+	+	
Küstenstation	+				
Steuer- und Regeltechnik	+	+	+		
Meßtechnik		+	+	+	+

An Beispielen sollen diese Abhängigkeiten näher erläutert werden:

- Im Bereich der "Süßwassergewinnung" bestimmt die Fördermenge VP:

- bei den Anlagenkosten:
- die Membranfläche der Membrankörper,
 - die Abmessungen des Sammelrohrsystems,
 - die Dimensionierung des Druckbehälters;

- bei den Installationskosten:
- die Montagestunden,
 - den Aufwand für das Absenken und die Gesamthandhabung.

b) Im Funktionsbereich "Förderung" bestimmt die Einsatztiefe T z.B.:

- bei den Anlagekosten:
- die Leitungslänge für die Produktpipeline und das Kabel,
 - die Leistung der Pumpe,
 - die Länge der Entlüftungsleitung;

- bei den Installationskosten:
- die Kosten der Verlegung für Pipeline und Kabel,
 - den Aufwand zum Absenken der Anlage;

- bei den Betriebskosten:
- die Pumpleistung und Energieverluste;

- bei den Wartungskosten:
- den Aufwand für Aufholen und Absenken der Anlage bei Membranwechsel oder ähnlichem.

Nach demselben Prinzip wurden Abhängigkeitsmatrizen für die einzelnen Funktionsbereiche und Kostengruppen aufgestellt.

Eine anschließende Analyse ergab die Abhängigkeiten der Komponenten und betrieblichen Größen von den Hauptparametern hinsichtlich Art und Grad.

3.2 Aufbau einer Kostenfunktion

3.2.1 Zielgröße der Kostenfunktion

Die Ergebnisse der Untersuchung der Abhängigkeitsmatrix wurden mathematisch formuliert und in Rechenprogrammen zusammengefaßt. Diese Programme erstellen u.a. Gesamtkostenfunktionen, deren Zielgröße die Süßwassergestehungskosten für das jeweilige Anlagen-Konzept in DM pro m³ als Funktion der oben erläuterten Haupteinflußgrößen sind.

3.2.2 Kostenbereiche

Die für eine submarine Meerwasserentsalzungsanlage aufzuwendenden und die durch ihren Betrieb bedingten Kosten wurden in vier Bereiche gegliedert:

- a) Investitionskosten;
- b) Kapitalkosten;
- c) Betriebskosten;
- d) Instandhaltungs- und Instandsetzungskosten.

Diese Einteilung wurde gewählt, um die besonderen Verhältnisse bei einer submarinen Anlage besser berücksichtigen zu können.

Die Einteilung und die zugehörigen Konzepte wurden dabei unter Heranziehung betriebswirtschaftlicher Literatur und nach eingehenden Diskussionen mit Mitarbeitern betriebswirtschaftlicher Hochschulinstitute sowie mit fachkundigen Vertretern aus Wirtschaft und Industrie erarbeitet.

3.2.3 Rechenprogramme

Für die Berechnung der Wassergestehungskosten und der Kosten für die einzelnen Kostenbereiche bei den verschied-

denen Konzepten für submarine Anlagen zur Meerwasserentsalzung (vgl. Abschnitt 4.1) wurden folgende Programme entwickelt, deren Berechnungsablauf in Bild 3.1 dargestellt ist:

- PEGEOFF I - Einzelanlage für den Einsatz auf hoher See;
- PEGEOFF II - Anlagenverbund für den Einsatz auf hoher See;
- PELAGE I - Einzelanlage für den Einsatz vor der Küste;
- PELAGE II - Anlagenverbund für den Einsatz vor der Küste;
- SAQUK - Satelliten-Anlage für den Einsatz vor der Küste;
- SUBLAN I - Hybridanlage für den Einsatz vor der Küste;
- SUBLAN II - Hybridanlagenverbund für den Einsatz vor der Küste.

Diese Programme basieren auf der Verwendung beliebiger Membransysteme (vgl. Abschnitt 4.2.1.1), während die im folgenden genannten Programme vorerst nur für den Einsatz von Wickelmodulen programmiert sind:

- MODULO - Einzelanlage für den Einsatz vor der Küste;
- SAQMO - Satelliten-Anlage für den Einsatz vor der Küste;
- SUBMOL - Hybridanlage für den Einsatz vor der Küste.

Eingegeben werden die Werte für die Hauptparameter und die Preisangaben von Herstellern in modifizierter Form. Unter modifizierter Form wird verstanden: in Einzelprogrammen werden die Angaben der Hersteller von Komponenten oder die Kosten für Aktivitäten in Abhängigkeit von den problembeschreibenden Parametern in algebraische Beziehungen umgewandelt. Die Koeffizienten dieser Funktionen gehen in das Hauptprogramm ein und bilden in ihrer Gesamtheit die zur Berechnung der Kosten erforderlichen Koeffizientenmatrizen.

Als Programmiersprache wurde FORTRAN IV verwendet. Die Rechnungen wurden an einer CDC 3300 der Firma CONTROL DATA am "Regionalen Rechenzentrum Erlangen" der Universität Er-

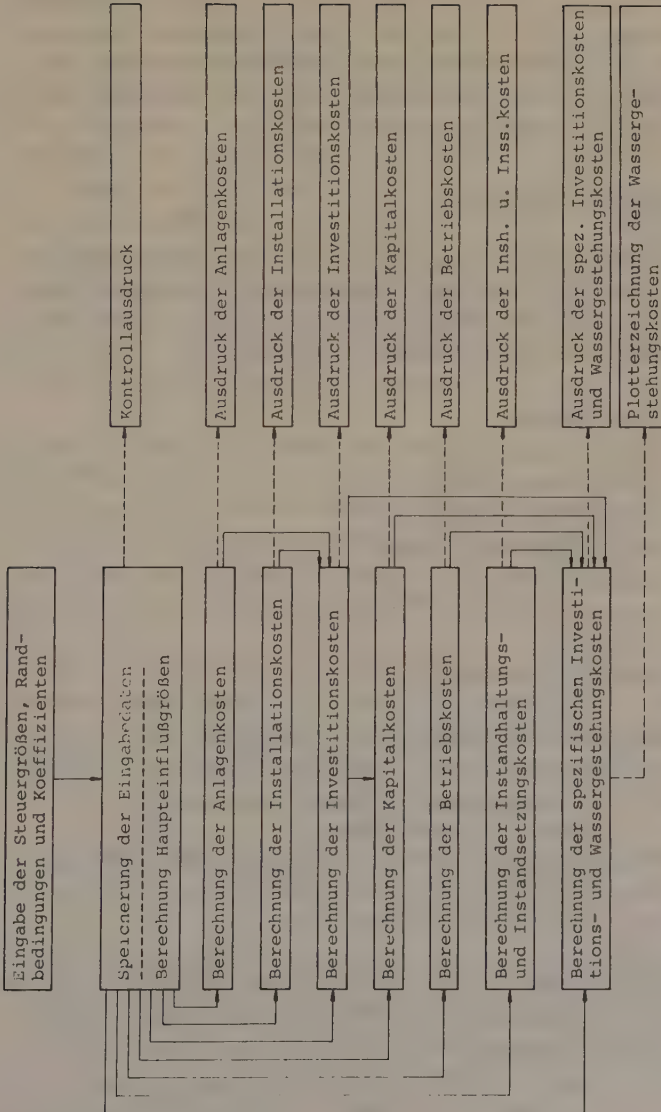


Bild 3.1: Berechnungsablauf und Datenfluß bei Programmen zur Kostenberechnung für submarine Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlagen

langen-Nürnberg durchgeführt. Nach der Erweiterung des Rechenzentrums im Jahre 1976 und der Umstellung auf einen Dreifachprozessor TR 440 der Firma TELEFUNKEN und einen Großrechner CYBER 172 der Firma CONTROL DATA mußten die Programme auf ihre Rechnerkompatibilität überprüft und entsprechend geändert werden.

3.2.4 Wassergestehungskosten

In Bild 3.2 bis Bild 3.5 sind Wassergestehungskosten für submarine Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlagen in verschiedenen Einsatzbereichen in Abhängigkeit von folgenden variablen Parametern gezeigt:

- Einsatztiefe,
- Einsatzentfernung,
- Tagesproduktion,
- Anzahl der Anlagen,
- Instandhaltungsperiode,
- Membranpreis,
- Strompreis,
- Zinssatz,
- Amortisationszeit.

Die Abkürzungen auf den Bildern bedeuten:

PELAGE: Rechenprogramm für eine Anlage für den Einsatz vor der Küste;
PEGEFF: Rechenprogramm für eine Anlage für den Einsatz auf hoher See;
AZEI: Amortisationszeit.

Auf den Bildern sind in die Berechnung eingesetzte Werte für die Parameter zu entnehmen, die vorwiegend die Wassergestehungskosten beeinflussen.

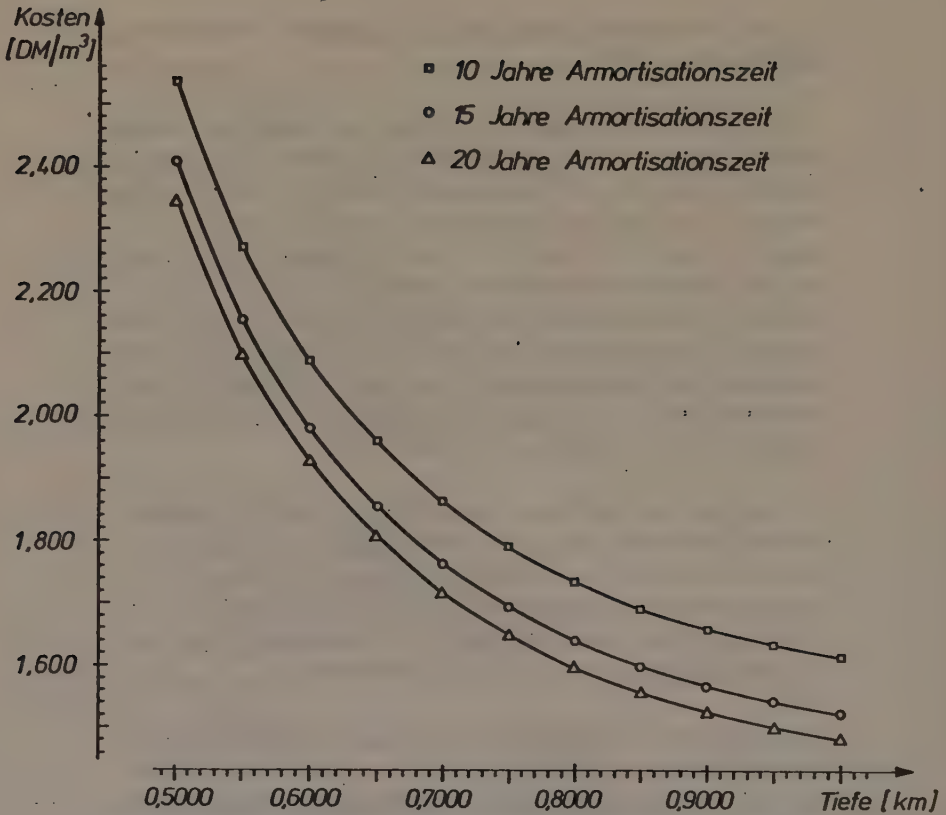
Die verwendeten Preis- und Kostenangaben entsprechen dem Stand von 1976.

Die Kurven in Bild 3.2 und Bild 3.3 zeigen die Wassergestehungskosten für eine offshore eingesetzte Anlage. Die Abhängigkeit der Wassergestehungskosten von der Einsatztiefe und von dem Membranpreis wird in den Kurvenverläufen deutlich. Der funktionale Zusammenhang zwischen der als konstant angenommenen Förderleistung der Pumpe und der tiefen- bzw. druckabhängigen spezifischen Durchflußrate der Membranen, der sich letztlich in einer Verringerung der benötigten Membranfläche und damit in geringeren Investitionskosten auswirkt, ist am Verlauf der Kostenkurven in Bild 3.2 zu erkennen.

Den Einfluß geringerer Membrankosten auf die Wassergestehungskosten zeigt besonders Bild 3.3. Die sich nach Durchlaufen eines Kostenoptimums mit zunehmender Einsatztiefe erhöhenden Wassergestehungskosten verdeutlichen den hierbei steigenden Kostenanteil der tiefenabhängigen Kosten für Anlagenkomponenten.

Die Kurven in Bild 3.4 und Bild 3.5 zeigen die Wassergestehungskosten für eine vor der Küste installierte Anlage, wobei die Kosten als Funktion der Einsatztiefe und der Einsatzortentfernung wiedergegeben sind. Die oben erläuterten Einflüsse sind auch hier zu beobachten.

Die Untersuchungen zeigen, daß die Wassergestehungskosten bei submarin angeordneten Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlagen einem Vergleich mit den Wassergestehungskosten sonst bekannter, auf dem Festland betriebener Entsalzungsanlagen standhalten. Bei der Annahme besonders günstiger Bedingungen ergaben die Parameterstudien sogar Werte, die unter den bisher erreichbar erscheinenden Wassergestehungskosten für die industrielle Gewinnung von Süßwasser aus Meerwasser liegen.



Wassergestehungskosten (PEGEOFF) als Funktion von T mit
AZEI = 10, 15, 20 Jahre VAR 01111

Tagesproduktion : 331,0 [m³/d]

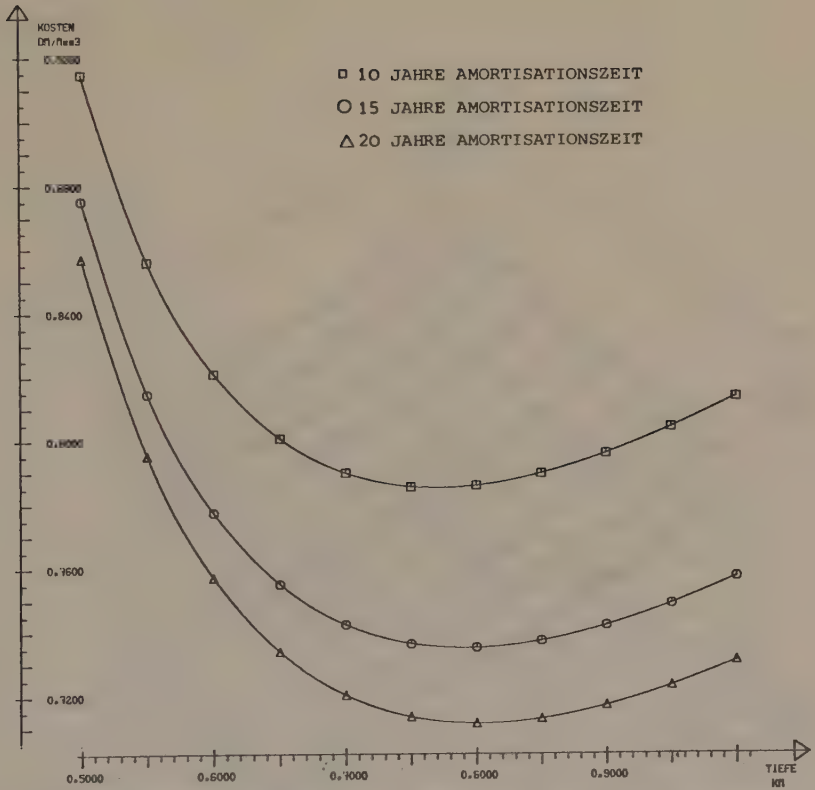
Membrankosten : 100,00 [DM/m²]

Instandhaltungsperiode : 1,5 [Jahre]

Strompreis : 0,08 [DM/kWh]

Zinssatz : 8,0 [%]

Bild 3.2: Wassergestehungskosten bei einer Anlage - offshore



WASSERGESTEHUNGSKOSTEN (PEGE OFF) ALS FKT. VON T MIT AZEI=10,15,20 JAHRE VAR10112

TAGESPRODUKTION: 331.0 [M**3/D]

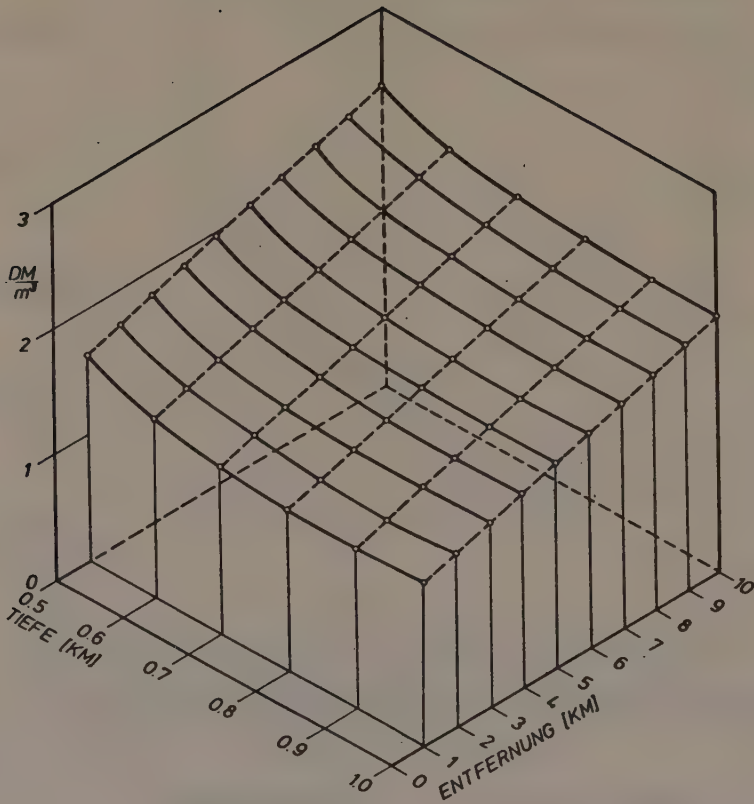
MEMBRANKOSTEN : 50.00 [DM/M**2]

INSTANDHALTUNGSPERIODE : 2.0 [JAHRE]

STROMPREIS : 0.08 [DM/KWH]

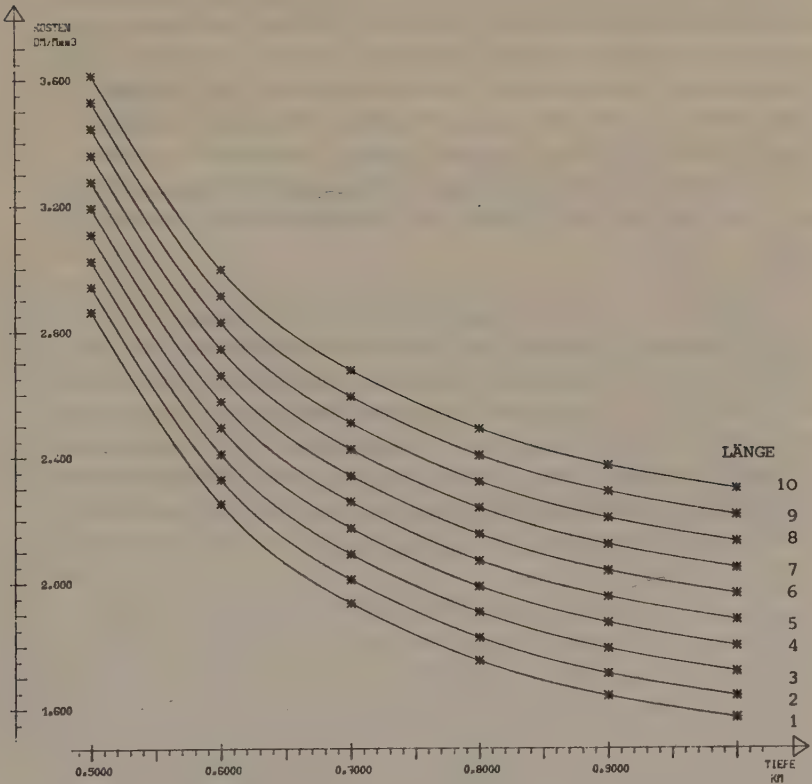
ZINSSATZ : 8.0 [%]

Bild 3.3: Wassergestehungskosten bei zehn Anlagen - offshore



Tagesproduktion	: 331.0 (m ³ /d)	Instandhaltungsperiode	: 1.5 (Jahre)
Membrankosten	: 50.00 (DM/m ²)	Strompreis	: 0.06 (DM/KWh)
Amortisationszeit	: 15 (Jahre)	Zinssatz	: 8.0 (%)

Bild 3.4: Wassergestehungskosten bei einer Anlage - Steilküste



WASSERGESTEHUNGSKOSTEN (PELAGE) ALS FKT. VON T (L=1-10 KM, AZE[=15 JAHRE] V11111

TAGESPRODUKTION:	331.0	[M**3/D]
MEMBRANKOSTEN	100.00	[DM/M**2]
INSTANDHALTUNGSPERIODE	1.0	[JAHRE]
STROMPREIS	0.33	[DM/KWH]
ZINSSATZ	8.0	[%]

Bild 3.5: Wassergestehungskosten bei zehn Anlagen - Steilküste

Systembedingt bergen diese Rechnungen und damit die Ergebnisse einen gewissen Spielraum in sich, da einige Preis- und Kostenannahmen vorerst schwer abschätzbar sind, wie zum Beispiel die Aufwendungen für das Verankern oder die Wartung einer Anlage, weil sie zunächst nicht durch einschlägige Erfahrungen belegt werden können. Andererseits ist eine namhafte Firma der Meinung, daß diese Kosten beherrschbar sind und auf keinen Fall das Verfahren stark negativ belasten würden.

Abschließend hierzu sei angemerkt, daß neuerlich für eine kommerzielle Anlage mit einer Produktion von $6\,000\text{ m}^3/\text{d}$, bei einer günstigen Konstellation und mit Preis- und Kostenannahmen von 1979 mittlere Wassergestehungskosten von circa $2,-\text{ DM}/\text{m}^3$ ermittelt wurden. In die Konzeption dieser Anlage flossen die Ergebnisse ein, die während der Durchführung der im folgenden beschriebenen Arbeiten und Untersuchungen gesammelt werden konnten.

4 Konzeption submarine Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlagen

4.1 Anlagenkonzepte

Der Grundgedanke, den hydrostatischen Druck in größeren Meerestiefen für technische Anwendungen des Prinzips der Umkehrosmose heranzuziehen, ist nicht neu und findet sich auch in US-Patentschriften [59 bis 61]. Ansätze zur Realisierung und quantitativen Bewertung submarin angeordneter Anlagen dieses Prinzips - auch im Vergleich zu thermischen Entsalzungsverfahren - findet sich bei [62]. Entsprechend dem Stand der Membranforschung bzw. dem der Meerestechnik Ende der sechziger Jahre lagen darüber hinaus keine experimentellen oder rechnerischen Ergebnisse zum Prinzip als solchem oder zu dessen anlagentechnischer Verwirklichung vor. Von dieser Situation nahmen die Bemühungen ihren Ausgang, das Konzept einer submarinen Anlage zur Meerwasserentsalzung nach dem Prinzip der Umkehrosmose zu entwerfen. Dieses baut auf den Ergebnissen der Membranentwicklung, auf den Erfahrungen der modernen Offshore-Technik, den heute bestehenden Möglichkeiten des Verlegens von submarinen Rohrleitungen und Seekabeln sowie auf den Fortschritten der allgemeinen Systemtechnik unter Einbeziehung technischer Entwicklungen aus angrenzenden Gebieten auf [16, 63 bis 68].

Eine Zuordnung der am Lehrstuhl für Apparatechnik und Anlagenbau in der Entwicklungsphase durchgeführten Untersuchungen zu den Wissensgebieten Meerwasserentsalzung, Offshore-Technik und Ozeanographie erläutert die Graphik in Bild 4.1. Der Untersuchungsbereich umfaßte und stützte sich auf:

- problemverwandte Teilgebiete (1+4, 2+4, 3+4) aus den Disziplinen Meerwasserentsalzung (1), Offshore-Technik (2) und Ozeanographie (3);
- interdisziplinäre Bereiche (1+2, 2+3, 3+1) aus je zwei dieser Wissensgebiete;

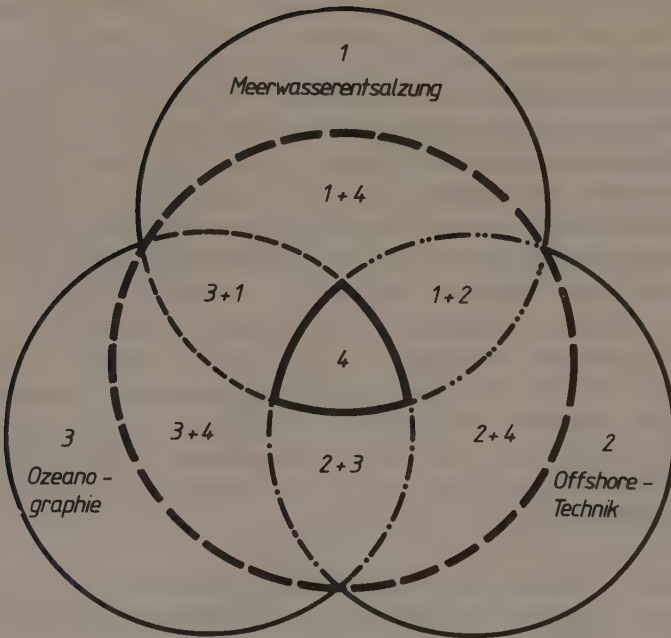


Bild 4.1: Untersuchungsbereich Submarine Umkehr-
osmose - Meerwasserentsalzungsanlagen

- einen Zentralbereich (4), der Teile aus allen drei Disziplinen verwendet und das Kernstück der systemanalytischen Untersuchungen bildete.

An einigen Beispielen sollen Aspekte und Ergebnisse aus den Wissensgebieten 1 bis 3 näher erläutert werden, die unter Einschluß des Zentralbereiches 4 zur Konzeption von submarinen Entsalzungsanlagen herangezogen wurden:

a) aus problemverwandten Teilgebieten:

- 1 + 4 Erfahrungen bei der Meerwasserentsalzung durch Umkehrosmose; Membranen für die einstufige Meerwasserentsalzung.
- 2 + 4 Aspekte für Konstruktion, Handhabung und Funktion von Apparaten und Aggregaten für den Tiefsee-Einsatz.
- 3 + 4 Physikalische und chemische Eigenschaften des Meerwassers und Strömungsverhältnisse in größeren Tiefen; Topographie des Meeresbodens; Einsatzbereiche.

b) aus interdisziplinären Bereichen:

- 1 + 2 Anordnungsmöglichkeiten für Membranen; tiefseegeeignete Modulsysteme; apparative Gestaltung submariner Entsalzungsanlagen.
- 2 + 3 Verlegen von Tiefseekabeln und submarinen Pipelines; Ortungs- und Navigationssysteme; tiefseetaugliche Kupplungen; Verankerungssysteme.
- 3 + 1 Beschaffenheit des Meerwassers als Rohwasser für die einstufige Entsalzung durch Umkehrosmose; Mittel zur Behebung der Konzentrationspolarisation; Verhalten der im Meerwasser gelösten Gase beim Permeationsvorgang.

Bei der Entwicklung der einzelnen Anlagenkonzepte wurde ebenfalls von den oben erläuterten Einsatzbereichen ausge-

gangen und gleichzeitig eine anlagen- und fertigungstechnisch bedingte Staffelung nach Produktionskapazitäten vorgenommen.

Anlagenkonzepte wurden entwickelt

a) für den Einsatz an Steilküsten:

- Einzelanlage (Bild 4.2);
- Anlagenverbund, mit verschiedenen Produktionseinheiten und zentraler Energieversorgung und Wasserübernahmestation;
- Satelliten-Anlage (Bild 4.3), mit verschiedenen Süßwassergewinnungseinheiten und zentraler Fördereinrichtung;

b) für den Einsatz auf hoher See:

- Einzelanlage;
- Anlagenverbund;

c) für den Einsatz an Küsten oder zur Versorgung von Produktionsanlagen auf hoher See:

- Anlagen-Schiff-Verbund, der beim Kreuzen in tiefen Gewässern Süßwasser gewinnt. Dabei dient das Schiff als Wasserspeicher.

Für den Einsatz in Gebieten, in denen auf dem Meeresboden befindliche Süßwasserquellen örtlich begrenzt ein Mischwasser mit Brackwassereigenschaften entstehen lassen, sind submarine Umkehrosmose-Brackwasserentsalzungsanlagen geeignet, die im Prinzip wie die oben genannten Anlagen aufgebaut sind.



Bild 4.2: Submarine Umkehrosmose Meerwasserentsalzungsanlage vor Steilküste

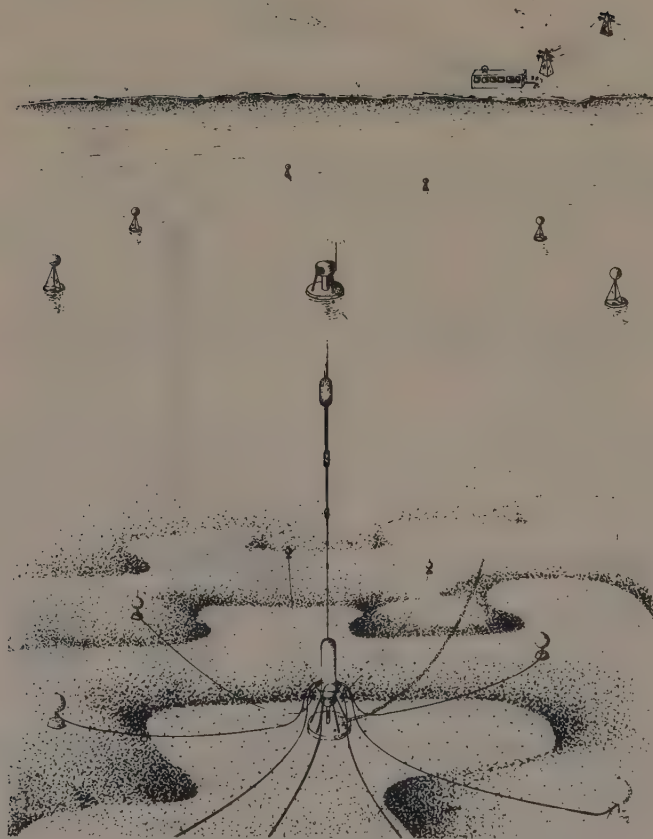


Bild 4.3: Satelliten-Anlage zur submarinen Umkehr-
osmose Meerwasserentsalzung

4.2 Aufbau submariner Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlagen

Bei der Entwicklung der oben erläuterten Anlagenkonzepte wurde eine weitgehende Verwendung handelsüblicher Komponenten angestrebt. Deren Eignung für den Einsatz in submarinen Anlagen wurde mit zahlreichen Herstellern und Forschungsstellen anlässlich von Besuchen, Tagungen und Ausstellungen im In- und Ausland diskutiert. Gleichzeitig wurde die technische Realisierbarkeit der Konzepte erörtert.

Am Beispiel einer Einzelanlage für den Einsatz an einer Steilküste soll im folgenden der Aufbau einer submarinen Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlage erläutert werden.

Die Anlage ist in sechs Funktionsbereiche aufgeteilt:

- 1) Süßwassergewinnung,
- 2) Förderung,
- 3) Positionierung,
- 4) Küstenstation,
- 5) Steuer- und Regeltechnik,
- 6) Meßtechnik.

Die Funktionsbereiche im einzelnen:

4.2.1 Süßwassergewinnung

Zum Funktionsbereich Süßwassergewinnung zählen die Anlagenelemente Membrankörper, Druckbehälter und gegebenenfalls Sammelleitungen.

4.2.1.1 Membrankörper

Der Membrankörper besteht aus den Komponenten: Membranen, Stützkörper und Anschlußstutzen bzw. aus Modul und Anbindungsvorrichtung.

Der Einsatz folgender Membransysteme (vgl. Abschnitt 5.2.1) mit außenliegender Entsalzungsschicht ist möglich:

- a) Flachmembranen, beidseitig auf scheibenförmige oder rechteckige, poröse Stützkörperplatten aufgebracht;
- b) Flachmembranen, um flexible, poröse Stäbe gelegt;
- c) Hohlfasermembranen mit Durchmessern im μ -Bereich, die als Büschel an den Enden des Sammelrohrsystems angeordnet sind;
- d) Kapillarmembranen mit Durchmessern im mm-Bereich.

Diese Membransysteme sind an den Enden des in Etagen verzweigten Rohrsystems hängend angeordnet. Die Hauptsammelrohre eines Systems enden jeweils an Strömungswächtern, die bei einem größeren Membrandefekt einen Salzwassereintritt in den Druckbehälter verhindern.

Bild 4.4 gibt eine Anlage für den Einsatz auf hoher See, die mit Plattenmodulen ausgerüstet ist, wieder. Der Ausschnitt verdeutlicht die Anordnung der Module und des Sammelrohrsystems.

Um die Erläuterungen zu den bei submarinen Umkehrosmose- Meerwasserentsalzungsanlagen verwendbaren Membransystemen theoretisch zu belegen, wird im folgenden auf Gesetzmäßigkeiten der Umkehrosmose eingegangen. Es werden nur die wesentlichen Gesichtspunkte erwähnt, da die Gesetzmäßigkeiten in der Literatur der letzten Jahre in einer Vielzahl von Arbeiten ausführlich behandelt werden (vgl. [25, 28, 35, 42 bis 45, 49, 69, 70, 80, 88 bis 90]).

Wie aus dem Namen des Verfahrens abzuleiten ist, handelt es sich bei der Umkehrosmose um die Umkehr des natürlichen

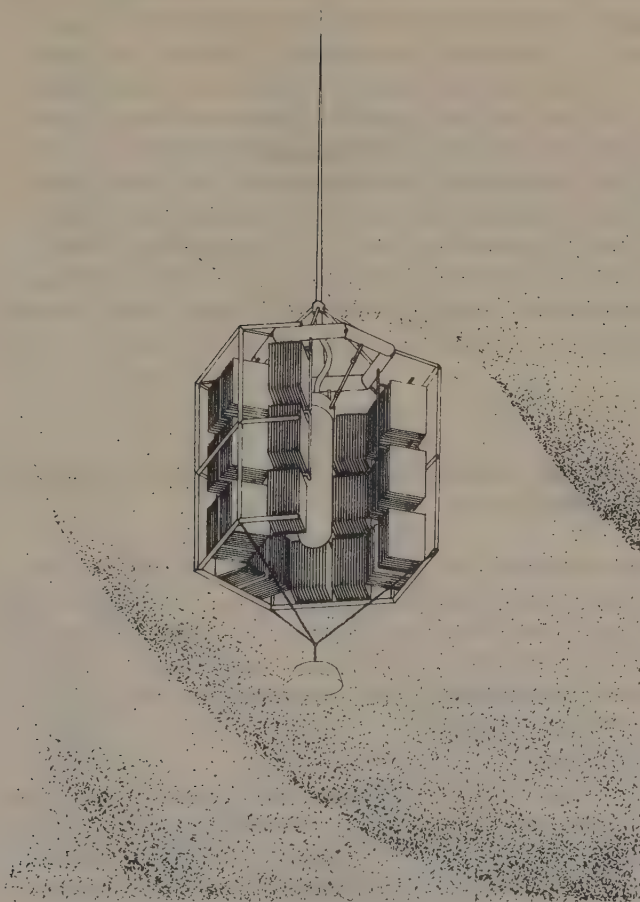


Bild 4.4: Mit Plattenmodulen ausgerüstete submarine Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlage für den Einsatz auf hoher See

osmotischen Verdünnungsbestrebens. Als allgemeines Kriterium ist anzusehen, daß mit Hilfe einer Druckdifferenz $\Delta p = p_1 - p_4$ (vgl. Bild 4.5) Wasser aus einer Salzlösung mit einer hohen Konzentration c_1 über eine semipermeable Membran in eine Lösung mit geringer Konzentration c_3 abgepreßt wird. Dabei muß die osmotische Druckdifferenz $\Delta \pi$ überwunden werden, so daß für den Prozeß nur eine wirksame Druckdifferenz ($\Delta p - \Delta \pi$) resultiert. Bei Meerwasser bedingt dies zum Beispiel schon einen Abzug vom Arbeitsdruck von mindestens 25 bar (vgl. Bild 4.6), da der osmotische Druck des Meerwassers circa 25 bar beträgt. Der osmotische Druck einer Lösung wird dabei näherungsweise in Analogie zur Zustandsgleichung idealer Gase nach dem Van't-Hoff'schen Gesetz berechnet als

$$\pi = C_G \cdot R \cdot T$$

mit C_G = Konzentration des Gelösten, R = Gaskonstante und T = absolute Temperatur.

Der Transportmechanismus für die einzelnen Komponenten einer Lösung durch die Membranen hindurch ist noch nicht vollständig geklärt. Konkurrierend werden z.Zt. mehrere Modellvorstellungen diskutiert, von denen die wichtigsten sind: das Lösungs-Diffusionsmodell, das Porenmodell und eine phänomenologische Beschreibung.

Die quantitative Beschreibung des Stofftransports für die sehr dichte Umkehrosmose-Membran ist dabei über das Lösungs-Diffusionsmodell möglich [69]. Dem Lösungs-Diffusionsmodell, bei dem die Membran als homogenes Kontinuum angesehen wird, liegt die Annahme zugrunde, daß sowohl das Lösungsmittel als auch der gelöste Stoff unabhängig voneinander durch die Membran transportiert werden. Der Molenfluß jeder Stoffart ist dabei dem Gradienten des chemischen Potentials in der Membran proportional. Zudem geht man davon aus, daß zwischen den entsprechenden Konzentrationen C_2 und C_{2M} be-

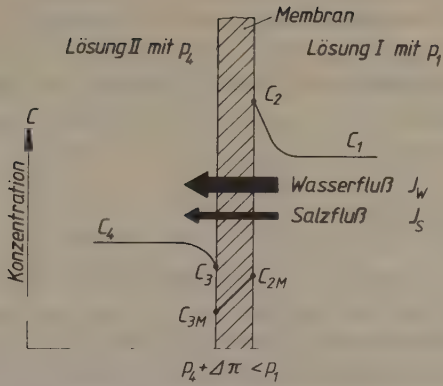


Bild 4.5: Konzentrationsverlauf an Umkehrosmose-Membran [69]

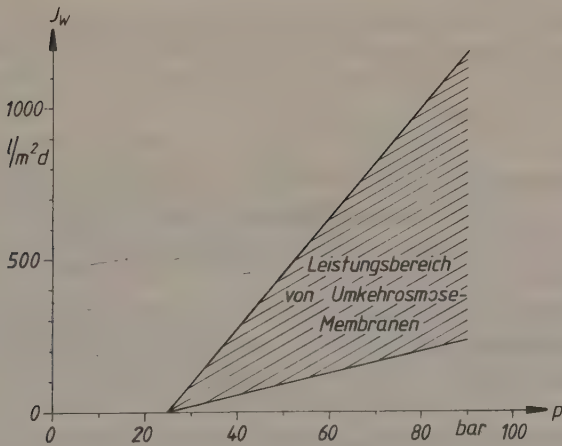


Bild 4.6: Spezifische Permeatleistungen (schematisch)

ziehungsweise C_3 und C_{3M} an den Phasengrenzen Membran/Lösung (vgl. Bild 4.5) trotz des irreversiblen Transportvorgangs ein Gleichgewicht besteht und daß der Transportwiderstand durch Sorption bzw. Desorption vernachlässigt werden kann [69, 70]. Diese Modellvorstellung liefert für den Massefluß des Lösungsmittels, im Falle der Meerwasserentsalzung also des Wasser:

Permeatfluß: $J_w = \rho_w \cdot A (\Delta p - \sigma \cdot \Delta \pi)$

mit J_w = Durchfluß des Wassers; ρ_w = Dichte des Wassers; A = Membrankonstante für den Wasserfluß; Δp = an der Membran anstehende hydrostatische Druckdifferenz; σ = Reflexionskoeffizient; $\Delta \pi$ = zwischen Konzentrat- und Permeatseite vorherrschende osmotische Druckdifferenz. Die Membrankonstante A berücksichtigt dabei im Zähler den Diffusionskoeffizienten des Lösungsmittels in der Membran und das partielle Molvolumen des Lösungsmittels, im Nenner die Gaskonstante die absolute Temperatur und die effektive Membrandicke, d.h. die Länge der Diffusionsstrecke in der Membran.

Für den Massefluß des Gelösten, bei der Meerwasserentsalzung der Salze, erhält man:

Salzfluß: $J_s = B (C_1 - C_4)$

mit J_s = Durchfluß der Salze; B = Membrankonstante für den Salzfluß; $(C_1 - C_4)$ = Konzentrationsdifferenz gelöster Stoffe in der Lösung zu beiden Seiten der Membran (vgl. Bild 4.5).

Der Permeatfluß bzw. Lösungsmittelfluß J_w ist somit proportional dem Druckgefälle ($\Delta p - \Delta \pi$), während der Salzfluß J_s dem Konzentrationsgefälle ($C_1 - C_4$) proportional ist.

Die Durchlässigkeit einer Membran für die in einem Lösungsmittel gelösten Stoffe ist je nach den Eigenschaften dieser

Inhaltsstoffe verschieden. Die Fähigkeit der Membran, Inhaltsstoffe vom Lösungsmittel abzutrennen wird als Rückhaltevermögen bezeichnet. Die technische Definition dieses Rückhaltevermögens ist näherungsweise:

$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_1}\right) 100 \%$$

mit R = Rückhaltevermögen, C_p = Konzentration des gelösten Stoffes im Permeat und C_1 = Konzentration des gelösten Stoffes im Rohwasser.

Die meisten Membranen verändern sich langsam im Laufe der Betriebszeit ohne daß sich z.B. Abscheidungen auf ihnen bilden, wobei besonders der Permeatfluß J_w absinkt. Eine Ursache wird in der allmählichen Zusammenpressung (compaction) der Membran unter der Wirkung des Betriebsdruckes gesehen. Ist J_B der Fluß nach der ersten Betriebsstunde und J_t derjenige nach t Betriebsstunden, so gilt:

$$\log J_t = -m \log t + \log J_B.$$

Maßgebend für die Konstanz des Flusses ist also die Größe m , die bei guten Membranen im Bereich von 0,03 liegt.

Strömt eine salzhaltige Lösung unter Betriebsdruck über eine Membran hinweg, so wird ihr längs ihres Strömungsweges Lösungsmittel, z.B. Wasser, entzogen, d.h. sie wird aufkonzentriert. Dadurch erhöhen sich ihr osmotischer Druck und damit der zur Entsalzung erforderliche Druck- bzw. Energieaufwand. Die Lösung in der Grenzschicht der Membran kann sich dabei so aufkonzentrieren, daß der Permeatfluß aufgrund des sinkenden Wirkdruckes stark abnimmt. Diese Erscheinung der Aufkonzentrierung direkt an der Membran, Konzentrationspolarisation genannt, kann durch geeignete Strömungsführung und -geschwindigkeiten vermieden werden.

Für die oben aufgeführten Membransysteme für eine submarine Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlage sind Membranen mit geringen Filtrationsstromdichten einzusetzen, da bei der Verwendung von einstufig meereswasserentsalzenden Membranen mit hohen spezifischen Permeatleistungen die durch die Meeresströmung bewirkte Anströmung der Membranen voraussichtlich nicht ausreicht, um die sich bildende Konzentrationspolarisation in der Grenzschicht vor der Membran zu vermeiden. Bestätigt wird dies durch von Prof. Rautenbach und Mitarbeitern [49, 69, 90] durchgeführte Untersuchungen über das Verhalten von Umkehrosmose-Membranen unter simulierten submarinen Bedingungen und ohne Zwangsanströmung. Das Konzept der submarinen Entsalzung gestattet jedoch auch mit geringen Filtrationsstromdichten zu arbeiten, da in diesem Fall zur Aufrechterhaltung der Strömung des Salzwassers keine Energie und damit keine zusätzlichen Betriebskosten aufgebracht werden müssen.

Bei der Verwendung von Membranen mit hohen Filtrationsstromdichten oder von handelsüblichen Kompaktmodulen, wie z.B. Hohlfaser- oder Wickelmodulen (Bild 4.7), muß die Konzentrationspolarisation durch eine hohe tangentiale Anströmung der Membranen erniedrigt werden. Ausreichende Anströmgeschwindigkeiten können an submarinen Anlagen dabei durch eine Reihe von Vorrichtungen nach verschiedenen Wirkprinzipien erzeugt werden wie z.B. durch sog. Turbulatorpumpen oder Aggregate nach Art einer Wasserstrahlpumpe. Der zusätzliche spezifische Energiebedarf der Anlage erhöht sich dadurch, wird aber durch höhere Leistungsdichten an der Membran kompensiert.

Mögliche Ausführungen für das Anlagenelemente Membrankörper sind in der morphologischen Analyse (vgl. Abschnitt 4.3) in Tabelle 4.1 dargestellt.

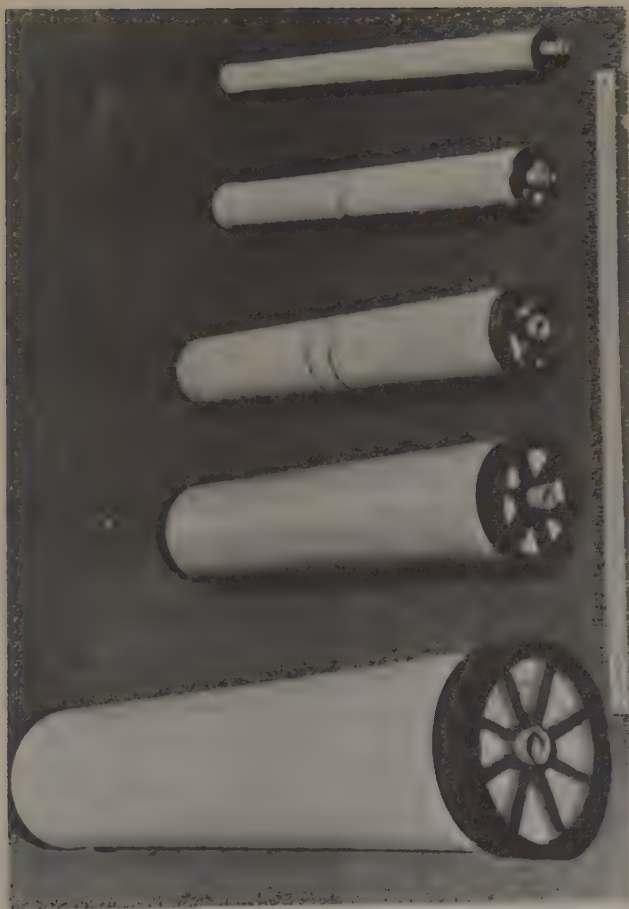


Bild 4.7: Wickelmodule von Fluid Systems Division / UOP

Funktionen / Systeme	Lösungsmöglichkeiten				
	Celluloseacetat	Polyamid	Polyimid	poröses Glas	
Membranwerkstoff					
Membranstruktur	symmetrisch	asymmetrisch	mehrschichtig		
Membrangeometrie	Flachmembran	Hohlfaser-membran	Kapillar-membran	Schlauch-membranen	
Filtrationsstrom-dichte	gering	hoch			
Modulkonstruktion	Plattenmodul	Stabmodul	Wickelmodul	Hohlfasermodul	
Modulanbindung	starr	flexibel	kombiniert		
Rohwasseranströmung	frei	erzwungen	kombiniert		

Tabelle 4.1: Morphologische Analyse des Anlagenelementes Membrankörper

4.2.1.2 Druckbehälter

Die apparative Gestaltung des Druckbehälters wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst, wie z.B. verwendetes Modulkonzept, erforderliche Tagesleistung und vorgesehene Einsatztiefe. Die im folgenden angegebenen Werte sind auf eine Anlage mit einer Förderung von circa $300 \text{ m}^3/\text{d}$ und einem Modulsystem mit geringer Filtrationsleistung bezogen.

Das druckfeste System nach Bild 4.8 besteht aus drei Komponenten: einem über dem Druckgefäß angeordneten Torus mit etwa 6 m Außendurchmesser, bestehend aus Rohrsegmenten mit rund 500 mm Innendurchmesser, in den die Sammel-systeme einmünden. An dem Torus sind Stützleitungen angeflanscht, die auf der unteren Seite am Druckgefäß enden. Diese Komponenten, aus Transportgründen in Einzelelemente zerlegbar, bilden den Grundkörper der submarinen Entsalzungsanlage und dienen gleichzeitig als Süßwasserspeicher. Die Höhe des Druckgefäßes trägt etwa 4 m, der Durchmesser variiert je nach Pumpenanordnung zwischen 0,8 und 1,2 m. Ein Rohrgerüst umschließt die Außenabmessungen und schützt die Membranen beim Ausbringen vor Beschädigungen.

4.2.2 Förderung

Der Funktionsbereich Förderung (vgl. Abschnitt 4.2) umfaßt die Anlagenelemente Pumpe, Transportpipeline, Energieversorgungs-komponenten und Entlüftungssystem.

4.2.2.1 Pumpe

Als Pumpe wird eine in der Offshore- und Erdöltechnik bewährte, wartungsfreie, vielstufige Unterwasserpumpe eingesetzt. Sie ist am Druckgefäßdeckel angeflanscht und

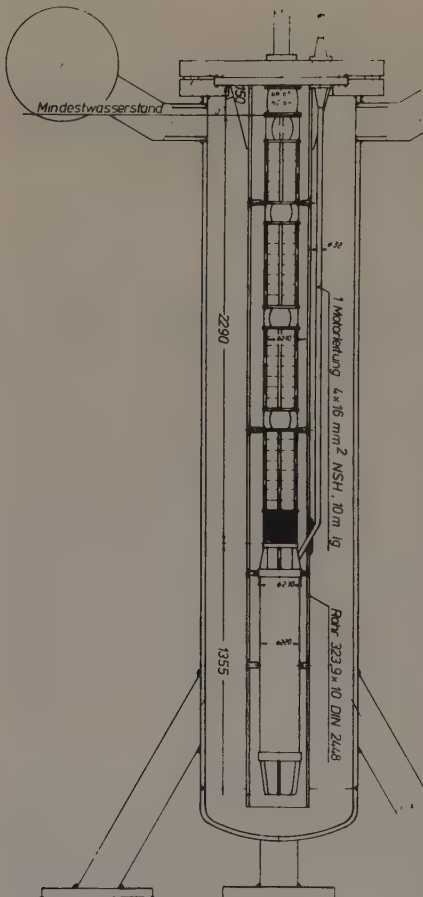


Bild 4.8: Konstruktionsvorschlag für Süßwasser-
sammelbehälter mit coaxialer Pumpe

wird durch ein Stützrohr vor Biegebeanspruchungen bewahrt, die durch die überaus schlanke und lange Bauweise möglich sind. Durch das Stützrohr wird außerdem eine Kühlung des Pumpenantriebs durch das abzupumpende Wasser bewirkt, da dies zwangsläufig am Antriebsgehäuse vorbeiströmt (Bild 4.6). Weiterhin können durch diese Anordnung noch im Wasser verbliebene Gasblasen ausgasen, womit Schäden an der Pumpe und Störungen im Fördersystem vermieden werden.

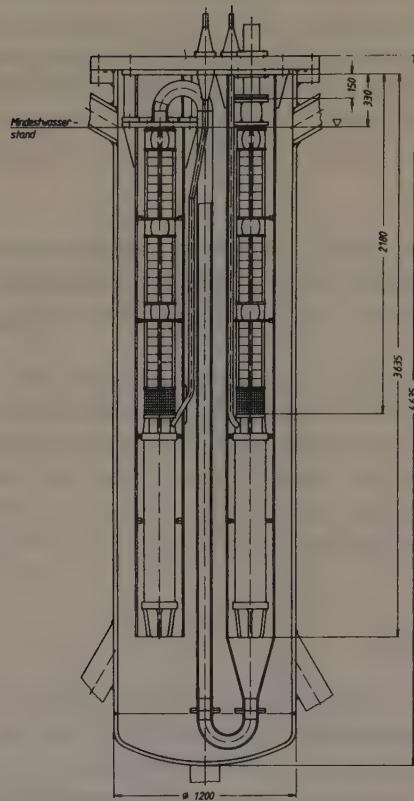
Für größere Tiefen und/oder Fördermengen werden Pumpen in Tandemanordnung im Druckbehälter angeordnet, um listenmäßige Erzeugnisse verwenden zu können (Bild 4.7) [71].

Der Pumpenantrieb ist ein sogenannter naßlaufender Elektromotor mit Druckausgleich und einer Betriebsspannung von 1 000 Volt. Für die oben angegebene Fördermenge von $300 \text{ m}^3/\text{Tag}$ und bei einer Einsatztiefe der Anlage von etwa 500 m beträgt die Nennleistung rund 35 kW, entsprechend einem Leistungsaufwand von 2,8 kWh je m^3 geförderten Süßwassers.

4.2.2.2 Produktpipeline

Mittels der Pumpe wird das Süßwasser durch eine Rohrleitung, die am Meeresboden verlegt ist, bis zur Wasserübernahmestation gefördert. Diese Unterwasserpipeline kann als Kunststoff- oder Stahlrohrleitung ausgeführt sein.

Da die Druckdifferenz an der Rohrleitungswand zwischen dem hydrostatischen Druck des Meerwassers von außen und dem Druck des Süßwassers - hydrostatisch und dynamisch - von innen gering ist, bietet sich hier Kunststoff an. Weitere Vorteile sind der geringe Preis und die Einfachheit der Verlegung.



Gewicht pro Aggregat: ca. 410 kg aufgetaucht
 ca. 336 kg getaucht
 Motorfüllmenge ca. 19 Liter in ab. Gewicht enthalten

Quelle: Pfeuffer, Hettling

Unterwasserpumpen
 in Tandemanordnung

Bild 4.7: Unterwasserpumpen in Tandemanordnung

Für die Brandungszone an der Küste ist wie üblich ein spezielles Schutzrohr vorgesehen.

4.2.2.3 Energieversorgungskomponenten

Für die Energieversorgung der Pumpe wird ein Seekabel eingesetzt, in dem gleichzeitig die Leitungen für die anfallenden Steuer-, Meß- und Regelaufgaben integriert sind. Leitungen dieser Art können für beliebige Leistungen und Spannungen ausgelegt werden, begrenzt nur durch die maximal zulässige Spannung im Offshore-Betrieb. Bei Spannungen im kV-Bereich, die bei Anlagen mit großen Förderleistungen aus wirtschaftlichen Erwägungen einzusetzen sind, ist an der Anlage ein Unterwassertransformator vorgesehen.

Die Zuführung der Energie kann je nach Anlagenkonzept vom Land her, aus dem Bordnetz eines Schiffes oder eines Halbtauchers, von einer Oberflächenboje oder von einem räumlich getrennt aufgestellten autonomen Energieversorgungssystem auf dem Meeresboden her erfolgen. Neuere Entwicklungen, besonders in der Nukleartechnik, lassen für die Zukunft mehrere Alternativen für die letztgenannte Möglichkeit erwarten [72, 73].

4.2.2.4 Entlüftungssystem

Zum Abtransport der Gase, die beim Entsalzungsvorgang durch die Membranen permeieren können (vgl. Abschnitt 5.2.3), ist ein Entlüftungssystem notwendig. Bei einer näher untersuchten Variante ist hierfür eine Entlüftungsleitung vorgesehen, die von der Anlage zu einer Boje an der Meeresoberfläche führt. Ein Schnorchel am oberen Ende sichert die Leitung vor dem Eindringen von Spritzwasser und überkommenden Wellen.

Für diese Aufgabe können druckfeste Schlauchleitungen von 1" bis 2" Innendurchmesser oder Bündelrohre eingesetzt werden, die auch bei atmosphärischem Innendruck dem der Wassertiefe entsprechenden Außendruck von bis zu 100 bar standhalten. Die Schlauchleitungen zeichnen sich durch hohe Zugfestigkeit und Flexibilität aus und werden in ähnlicher Art in der modernen Offshore-Technik für vielerlei Zwecke und unter extremen Belastungen eingesetzt. Beim Einsatz entsprechender zugfester Leitungen können diese gleichzeitig als Tragseil beim Absenken und Aufholen der Anlage Verwendung finden. Auf Versuche, die mit solchen Schlauchleitungen am Lehrstuhl für Apparate-technik und Anlagenbau durchgeführt wurden, wird in Abschnitt 5 eingegangen.

Eine zweite Variante ist ein Entlüftungssystem in Form einer Abblasevorrichtung, die ebenfalls in Abschnitt 5 beschrieben wird.

4.2.2.5 Hybridkabel

Für den Einsatz bei Tauchbooten für Überwachungsaufgaben in der Offshore-Technik wurden kombinierte Leitungen entwickelt, die nach dem Nabelschnur-Prinzip die Versorgung der Aggregate mit Energie und Luft ermöglichen. Für submarine Entsalzungsanlagen sind ähnliche Lösungen möglich, wobei in ein sogenanntes Hybridkabel die Energieversorgungskabel, Steuer- und Meßleitungen, die Entlüftungsleitung und die Produktpipeline integriert sind. Die Armierung des Hybridkabels dient als Halteseil und kann für das Niederbringen und Aufholen der Anlage eingesetzt werden.

4.2.3 Positionierung

Die im Funktionsbereich Positionierung (vgl. Abschnitt

4.2) zusammengefaßten Anlagenteile entsprechen den offshore-spezifischen Gegebenheiten beim Einsatz submariner Entsalzungsanlagen. Hierunter werden verstanden: Markierungsboje, Auftriebskörper, Verankerungsseile sowie bedarfsweise eine submarine Multikupplung (vgl. Abschnitt 5.2.1).

Die Markierungsboje enthält neben dem Ende des Entlüftungsschlauches ein Blinklicht und ist mit einem Radarreflektor bestückt. Von der Boje könnten per Funk Meßdaten an Land übertragen werden. Dazu gehören sowohl Meßdaten der Anlage, die über ein Kabel in der Entlüftungsleitung zum Übertragungssystem gelangen, als auch allgemeine meteorologische und ozeanographische Daten.

Die Verankerung am Meeresboden ist je nach Anlagengröße und in Abhängigkeit von den örtlichen Gegebenheiten auszuführen. Denkbar ist die Montage der Anlage auf einer im Meeresboden verankerten turmartigen Konstruktion in circa 30 bis 50 m Abstand vom Boden, um das Ansaugen von Feinstsänden zu vermeiden, die von der Strömung in unmittelbarer Nähe des Meeresbodens mittransportiert werden. Bei einer anderen Variante ist die Anlage, die durch Auftriebskörper in Schwebelage gehalten wird, über eine Kette oder ein Seil an einer Art Ankerstein am Meeresboden befestigt.

4.2.4 Küstenstation

In der Küstenstation sind untergebracht: die Warte für Steuer-, Meß- und Regeltechnik, die Wasserübernahme mit Speichertanks sowie die Energieversorgung. Für diese kann bei einem benachbarten Netz ein Transformator, in entlegenen Gegenden ein Dieselaggregat vorgesehen werden.

4.2.5 Steuer- und Regeltechnik

Dieser Bereich umfaßt Instrumente und Anlagenelemente, die der Funktions- und Produktionsüberwachung sowie -steuerung dienen. So z.B. einen Niveauregler, der ein Trockenlaufen der Pumpe verhindern und über den eine Förderstromregelung mittels eines Drosselventils am Ende der Leitung vorgenommen werden kann, ferner Anzeigen für die Strömungswächter und deren Betätigungsautomatik.

4.2.6 Meßtechnik

Gemessen und aufgezeichnet werden der Druck und die Temperatur innerhalb und außerhalb der Anlage, der Salzgehalt des Süßwassers, die produzierte Süßwassermenge und Kenndaten der Energieversorgung wie Spannung, Strom und Leistungsaufnahme.

4.3 Morphologische Analyse zum Anlagenaufbau

Der oben beschriebene Aufbau einer submarinen Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlage stellt eine mögliche Ausführung dar. Für die Komponenten der einzelnen Funktionsbereiche und das Funktionsprinzip der einzelnen Systeme sind weitere technische Lösungen möglich. An Beispielen für den Funktionsbereich "Förderung" ist dies in Tabelle 4.2 dargestellt. Die Konzeption einer Anlage

Funktionen / Systeme	Lösungsmöglichkeiten			
	Verdrängung	Druckerhöhung		
Pumpensysteme				
Pumpenantrieb	elektrisch	pneumatisch	hydraulisch	kombiniert
Produktpipeline	Stahlrohr	Kunststoffrohr	Schlauchleitung	
Produktpipeline-anbindung	submarin lösbar	nicht lösbar		
Produktpipeline-führung	auf Meeres-boden	zur Ober-fläche	an Schwimmern	
Entlüftungsart	kontinuierlich	diskontinuierlich		
Entlüftungssystem	Hochdruckschlauch	Bündelrohr	Abblasvorrichtung	Injektorsystem
Energiequelle	Landbase	Bordnetz	submarines System	Transformator
Energieübertragung	Seekabel	Hybridkabel	integriertes System	
Kabelanbindung	submarin lösbar	nicht lösbar		

Tabelle 4.2: Morphologische Analyse des Funktionsbereiches Förderung

erfolgt durch Auswertung einer morphologischen Analyse. Für jede Zeile im morphologischen Kasten, die entweder eine Funktion oder ein System charakterisiert, sind in den Spalten mehrere Lösungsmöglichkeiten aufgetragen. Diese werden einzeln bewertet, nach bestimmten Kriterien ausgewählt und zu einer Einheit zusammengestellt.

4.4 Betrieb

Bei normaler Funktion der Anlage ergibt sich für das oben beschriebene Konzept folgender Betriebszustand: das durch die Membranen permeierte Süßwasser gelangt über ein Sammlersystem in den Torus, in dem mitgeführten Gase ausgasen und über die Entlüftungsleitung entweichen. Das Wasser fließt durch Stützleitungen in das Druckgefäß und wird mittels der Pumpe zur Übernahmestation gefördert. Bei Stillstand der Pumpe füllt sich zunächst der Torus mit permeiertem Wasser, dann die Entlüftungsleitung bis zu dem Punkt, an dem die transmembrane Druckdifferenz auf den osmotischen Druck abgesunken ist. Die anlaufende Pumpe fördert - wegen des höheren Druckes am Saugstutzen zuerst mit gesteigertem Durchsatz - die in der Entlüftungsleitung gespeicherte Wassermenge. Ist diese abgepumpt, stellt sich der Wasserstand im Torus auf den normalen Betriebszustand ein.

Eine andere Variante sieht den Einbau eines Schwimmerventils zwischen der Anlage und der Entlüftungsleitung vor [74]. Bei einem Stillstand der Anlage würde der Druckbehälter vollständig gefüllt werden und sich ein höherer Innendruck, wie oben erläutert, einstellen.

Im Vergleich zu anderen Verfahren der Meerwasserentsalzung müssen hier also für das An- und Abstellen der Anlage keine besonderen Maßnahmen ergriffen werden.

4.5 Störfälle

Eine exakte Aussage über mögliche Störfälle beim Betrieb einer submarinen Entsalzungsanlage läßt sich erst treffen, wenn eine Anlage über längere Zeit betrieben wurde. Einige Störfälle und deren Beseitigungsmöglichkeiten können jedoch jetzt schon abgeschätzt und beurteilt werden.

Betriebsstörungen an einer submarinen Entsalzungsanlage müssen in zwei Kategorien unterteilt werden:

- a) Störungen, bei denen die Wiederherstellung des normalen Betriebszustandes von der Küstenstation aus bzw. über die Entlüftungsleitung erfolgen kann.
- b) Störungen, zu deren Beseitigung die Anlage an die Oberfläche gebracht werden muß.

Zum ersten Bereich zählen z.B. folgende Störungen:

- Ausfall eines Teiles der Membranfläche durch Niederschläge, deren Beseitigung bei einigen Membransystemen durch Rückspülen erfolgen kann.
- Intermittierender Pumpenbetrieb infolge geringer Durchflußraten an den Membranen. Durch Veränderung der Stellung des Drosselventils in der Wasserübernahmestation kann der Förderstrom so reduziert werden, daß die Minimumanzeige des Niveaureglers nicht erreicht und ein kontinuierliches Abpumpen gewährleistet wird.

Zum zweiten Bereich zählen u.a. folgende Störungen:

- größere Undichtigkeiten am Druckbehälter, Sammler- oder Rohrleitungssystem;

- Ausfall der Pumpe oder des Pumpenantriebes;
- Fehler am submarinen Energieversorgungssystem;
- Ausfall eines größeren Teiles der Membranfläche.

Zweifellos sind die Membranen die am ehesten stör anfälligen Anlagenkomponenten. Da zur Zeit nur mit Schätzwerten für Lebensdauer und Durchfluß gerechnet werden kann (das Zeitstandverhalten der Membranen und die systembedingte zeitliche Abnahme der Permeatflusses unter submarinen Verhältnissen sind noch nicht bekannt), muß mehr Membranfläche installiert werden, als dem Auslegungsdurchsatz entspricht. So können Membranausfälle oder -minderleistungen während einer Betriebsperiode bis zur nächsten Wartung ausgeglichen werden, indem z.B. über die Strömungswächter einzelne Einheiten ausgeschaltet werden.

Bei der Installation eines Anlagenverbundes oder einer Satelliten-Anlage (vgl. Abschnitt 4.1) kann das Erreichen der geforderten Fördermenge durch den Einsatz von Reserveeinheiten gewährleistet werden, die beliebig schaltbar sind.

4.6 Ausbringen der Anlagen

Zum Ausbringen einer Anlage kann auf die Erfahrungen der Offshore-Technik, der Seekabelverlegung und der Unterwasser-Rohrverlegetechnik zurückgegriffen werden [58, 63, 75 bis 79].

Folgende Vorgehensweise ist denkbar:

Die Verlegung des Seekabels und der Rohrleitung erfolgt kontinuierlich von Trommeln. Es kann z.B. ein Schiff

der Bauart eingesetzt werden, wie sie sich für Versorgungs-, Arbeits- und Begleitschiffe für Bohrinselfn bewährt hat (sogenannte Supply Vessels). Ihre Größenordnung liegt etwa im Abmessungsbereich: Länge 50 m, Breite 14 m, Gewicht 1100 t. Die zusätzliche Ausrüstung an Bord umfaßt einen Ausleger mit einer Seilscheibe, deren Durchmesser größer sein muß als der Mindestbiegeradius des abzusenkenden Kabels, sowie eine windenähnliche Vorrichtung. Abweichend von der üblichen Seekabelverlegetechnik wird das Kabel von der Trommel, die integriertes Bestandteil der Winde ist, direkt zur Seilscheibe geführt.

Kabel und Rohrleitung sind bis zum Einsatzort möglichst weit voneinander entfernt zu verlegen, um Überschneidungen zu vermeiden.

Die Montage der Anlage erfolgt am Einsatzort, wofür an Bord ein Kran vorhanden sein muß. Die Einzelteile des Druckbehälters werden soweit an Bord zusammengefügt, wie es die Abmessungen des Schiffes erlauben. Die Endmontage erfolgt an der Wasseroberfläche unter Einsatz des Kranes und gegebenenfalls von Tauchern. Anschließend werden Kabel und Rohrleitung angekuppelt und das System insgesamt abgesenkt. Während die wechselnden Beanspruchungen beim Aufholen und Absenken auf das Kabel keinen schädlichen Einfluß haben, kann die Rohrleitung davon in Mitleidenschaft gezogen werden. Diese kann gegebenenfalls bei späteren Arbeiten über eine am Meeresboden verankerte Schnellschlußkupplung mit Positionierungssystem (vgl. Abschnitt 5.2.2) von der Anlage getrennt werden.

Das Absenken und Aufholen der Anlage erfolgt je nach Anlagentyp mit Hilfe des Hybridkabels oder eines Verankerungsseiles, eventuell unterstützt durch Füllen bzw. Lenzen des Druckbehälters.

Nach derselben Art erfolgt die Handhabung bei Wartungsarbeiten.

5 Untersuchungen und Entwicklung von Komponenten für submarine Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlagen im Rahmen der Konzeptphase

Bei Beginn der Arbeiten zur Konzipierung submariner Entsalzungsanlagen zeigte sich in Firmengesprächen, daß die Anforderungen an Komponenten für submarine Anlagen bei der angestrebten Verwendung handelsüblicher Apparateelemente und Armaturen zum Teil bisher nicht untersuchte Fragestellungen aufwarfen. Besonders traf dies für die verschiedenen Schlauchtypen zu, die wahlweise als Entlüftungsleitungen oder als Produktpipelines eingesetzt werden sollten.

5.1 Untersuchungen an Komponenten

Um Aussagen und Erfahrungswerte über das Verhalten von Hochdruckschläuchen beim Einsatz in submarinen Anlagen und bei entsprechenden Randbedingungen in größeren Meerestiefen zu erhalten, wurden am Lehrstuhl für Apparatechnik und Anlagenbau Untersuchungen an geeignet erscheinenden handelsüblichen Erzeugnissen durchgeführt. An Hydraulik-Hochdruckschläuchen wurde speziell die Außendruckbeständigkeit bei atmosphärischem Innendruck geprüft. Weiter wurde das Verhalten von handelsüblichen Niederdruckschläuchen und deren Innendruckbeständigkeit in Abhängigkeit von unterschiedlichen Druckänderungsgeschwindigkeiten untersucht. Die ersten Versuche wurden in der Druckkammer "TS" am Lehrgebiet Grundlagen der Meerestechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (Bild 5.1) mit Unterstützung der Mitarbeiter dieser Einrichtung durchgeführt. Für die weiteren Versuche wurde am Lehrstuhl für Apparatechnik und Anlagenbau eine geeignete Druckkammer entworfen und bei der Firma Josef van Opbergen, Neuss, gefertigt.

Neben der Protokollierung der Meßwerte wurde der Versuchsablauf mit Hilfe eines Video-Systems aufgenommen, um die Versuchsauswertung zu erleichtern und um schnell ablaufende Vorgänge transparent und auswertbar zu machen.

Einige Ausschnitte aus den Versuchsprotokollen zu den oben angesprochenen Versuchen sind im folgenden wiedergegeben. Sie beziehen sich auf die Überprüfung der Außen-druckbeständigkeit von Hydraulik-Hochdruckschläuchen.

5.1.1 Außendruckversuch an Hydraulik-Hochdruckschläuchen in Aachen

Untersucht wurden zwei Hydraulik-Hochdruckschläuche mit den Außendurchmessern 51 bzw. 34,3 mm und Längen von 1.655 bzw. 1.500 mm. Durch Abdrücken auf 150 bar Innendruck wurde die Dichtheit der Fittings und Schlauchanschlüsse überprüft. Die Prüfung gegen Außendruckbeständigkeit wurde bei atmosphärischem Innendruck durchgeführt. Dabei wurde die Druckkammer (Bild 5.1) mit Wasser gefüllt und bis zum Kollabieren des Schlauches mit Druckluft beaufschlagt. Bild 5.2 erläutert den Versuchsaufbau, Bild 5.3 zeigt einen Ausschnitt aus dem Meßdiagramm.

In beiden Fällen kollabierten die Schläuche bei 50 bar. Im Bereich von 2 bis 20 bar war am Schrägrohrmanometer eine geringfügige Abnahme des Volumens des Schlauchinneren zu beobachten. Bei 22 bar kam dieser Vorgang zum Stillstand, bei 50 bar kollabierten beide Schläuche schlagartig. Nach dem Versuchsende an den Schläuchen feststellbare Querschnittsveränderungen lassen auf örtlich bleibende Verformungen im Metallgewebe schließen.

Die untersuchten Schläuche in den gegebenen Abmessungen sind somit nur bis ca. 50 bar kollabierfest und folglich für den Einsatz in submarinen Anlagen nicht geeignet.

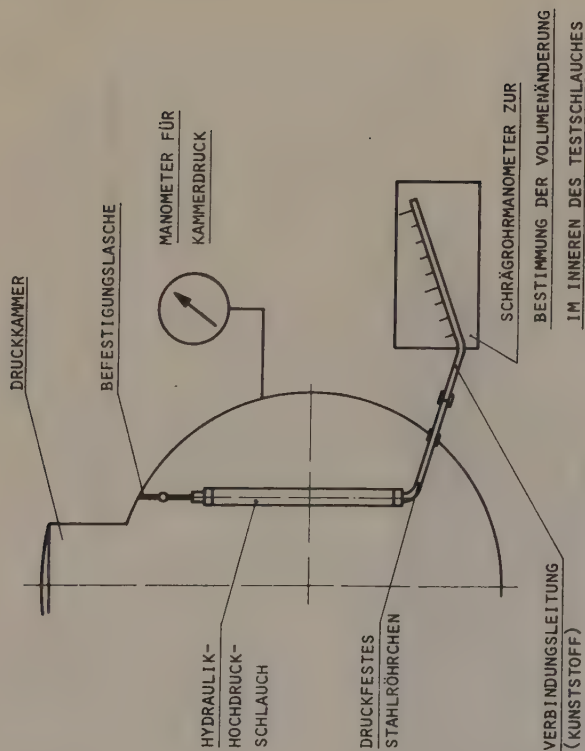


Bild 5.2: Skizze zum Versuchsaufbau "Außendruckversuch/
RWTH Aachen"

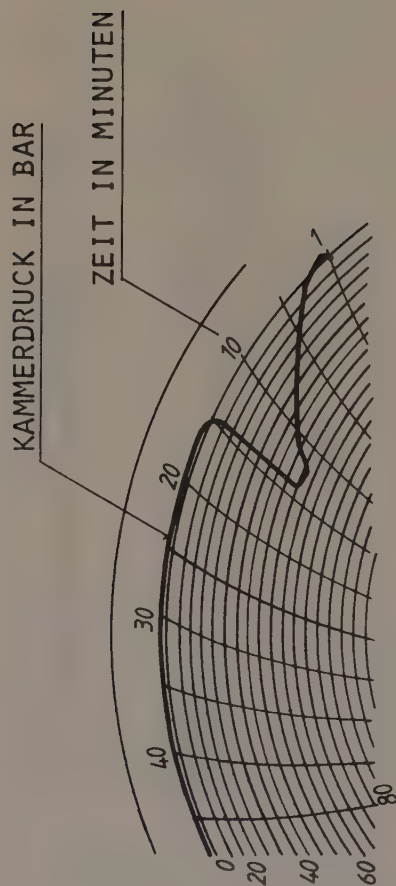


Bild 5.3: Ausschnitt aus Meßdiagramm

Der Hersteller, der eine wesentlich höhere Außendruckbeständigkeit erwartet hatte, beabsichtigt durch Veränderung des Verseilwinkels der Stahleinlagen eine höhere Außendruckbeständigkeit zu erreichen.

5.1.2 Außendruckversuch an Hydraulik-Hochdruckschläuchen in Erlangen

Untersucht wurden zwei Muster eines Hydraulik-Hochdruckschlauches mit 27,3 mm Außendurchmesser und 1.670 mm Länge. Die Versuche wurden in der Druckkammer DESCOS des Lehrstuhls für Apparatechnik und Anlagenbau durchgeführt (Bild 5.4), die für Druckversuche an Komponenten submariner Anlagen mit kleineren Abmessungen konzipiert wurde. Die Druckkammer ist 2.025 mm lang, hat einen Innendurchmesser von 150 mm, kann bei Betrieb mit Wasser bis 100 bar Innendruck beaufschlagt werden und bietet somit die Möglichkeit zur Simulation von Tiefseebedingungen. Zur Überprüfung der Dichtheit der Fittings und Schlauchanschlüsse wurden die genannten Schläuche zunächst mit 100 bar Innendruck abgedrückt. Für den Außendruckversuch wurden die Schläuche jeweils liegend in der Kammer angeordnet (Bild 5.5).

Die Stabilitätsprüfung ergab, daß Schlauchmuster 1 bei 72 bar kollabierte, Schlauchmuster 2 bei 68 bar. Die Versuche wurden mit verschiedenen Geschwindigkeiten für die Drucksteigerung durchgeführt. Hierbei bestätigte sich die Erfahrung aus anderen Versuchen, daß einer höheren Drucksteigerungsgeschwindigkeit ein höherer Kollabierdruck zugeordnet werden kann. Die Ergebnisse der insgesamt durchgeführten Versuche lassen jedoch noch keine abschließende Aussage zu.

Der Erfahrungsaustausch mit dem Hersteller des untersuchten Schlauches läßt erwarten, daß in Zukunft die Außen-



Bild 5.4: Druckkammer DESCOS des Lehrstuhl für Apparatechnik
und Anlagenbau der Universität Erlangen-Nürnberg;
Betrieb mit Wasser bis 100 bar

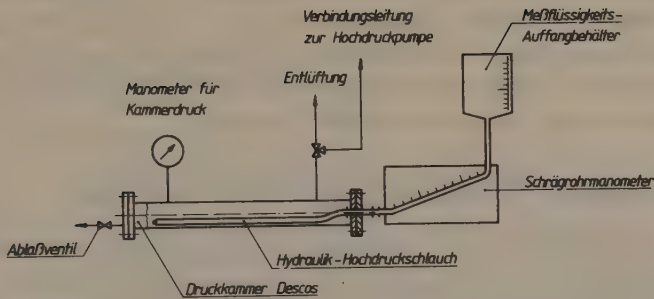


Bild 5.5: Versuchsstand für Außendruckprüfungen

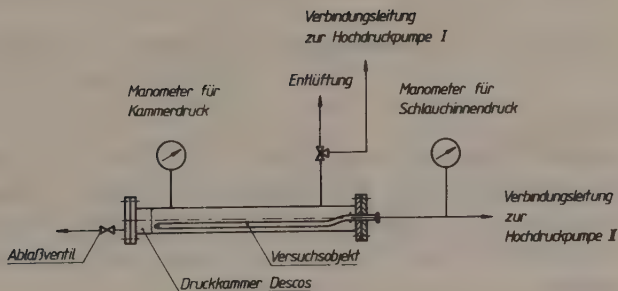


Bild 5.6: Versuchsstand für Differenzdruck-Prüfungen

druckbeständigkeit von Schläuchen der untersuchten Art noch gesteigert werden kann, ohne daß der Preis erhöht wird. Durch den Lehrstuhl für Apparatechnik und Anlagenbau bei weiteren Schlauchherstellern des In- und Auslandes angeregte Untersuchungen ergaben, daß die für den Einsatz an submarinen Anlagen geforderten Randbedingungen von mehreren Fabrikaten erfüllt werden.

5.1.3 Versuche mit Niederdruck-Schläuchen in Erlangen

Im folgenden wird ein kurzer Bericht über Versuche an handelsüblichen Niederdruck-Schläuchen wiedergegeben, durch die deren Eignung für den Einsatz als Produktpipeline für submarine Meerwasserentsalzungsanlagen überprüft werden sollte.

a) Aufgabenstellung

Untersuchung von mehreren Niederdruck-Schläuchen auf:

- Innendruckbeständigkeit;
- Innendruckbeständigkeit nach mehrmaligem vorangegangenen Kollabieren;
- Innendruckbeständigkeit nach Durchfahren verschiedener Druckspannen;
- Innendruckbeständigkeit nach längeren Belastungen mit kleineren Drücken als dem Berstdruck.

b) Versuchsapparatur

2 Hochdruckpumpen; Druckkammer DESCOS des Lehrstuhls für Apparatechnik und Anlagenbau; spezielle Schlauchanschlüsse zum Verschließen der Schlauchenden; spezielle Schlauchanschlüsse mit Durchführungen und Fittings; Manometer.

c) Versuchsaufbau

Je nach Art des Versuches wurden die Niederdruck-Schläuche:

- liegend in einem Schutzrohr angeordnet mittels einer Hochdruckpumpe bis zum Bersten mit Druck beaufschlagt;

- liegend in der Druckkammer angeordnet mit der ersten Hochdruckpumpe verbunden, während die zweite Hochdruckpumpe den Kammerraum mit Druck beaufschlagte (Bild 5.6).

d) Versuchsdurchführung

d.1) Berstversuche

Bei allen Berstversuchen wurden die Niederdruck-Schläuche in einer Schutzhülle (3" Kunststoffrohr) bis zum Bersten mit Druck beaufschlagt. Die Drucksteigerung erfolgte dabei mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, verschieden langen Pausen, nach unterschiedlichen Standzeiten und Drücken und nach verschiedenen Belastungen mit Außendruck und Innendruck in der Druckkammer.

d.2) Differenzdruck-Versuche

In der Druckkammer wurden verschiedene Differenzdruckspannen durchgeföhren. Der maximale Innen- oder Außendruck (bezogen auf den Niederdruck-Schlauch) lag bei 100 bar, der maximale Differenzdruck bei 10 bar.

e) Versuchsergebnisse

Nach den bisherigen Versuchen läßt sich bereits jetzt folgendes festhalten:

- e.1) Bei schneller Drucksteigerung werden die Werte der Hersteller in den meisten Fällen übertroffen;
- e.2) Die Berstdrücke sind für verschiedene Proben aus dem gleichen Schlauchmaterial unterschiedlich;
- e.3) Die untersuchten Schläuche reagieren verschieden auf gleiche Druckwechselbelastungen;

- e.4) Die Standzeit wirkt sich bei erhöhtem Innendruck unterschiedlich auf den Berstdruck aus;
- e.5) Dem Übergang "starres Rohr - Schlauch" muß besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden, wenn ein Niederdruckschlauch öfter kollabiert;
- e.6) Die untersuchten Proben halten - bei konstantem Druck in der Druckkammer - einem mehrmaligen Wechsel zwischen Kollabieren und dem Innendruck, der um 10 bar höher ist als der Kammerdruck, stand.

f) Schlußfolgerung

Die untersuchten Niederdruck-Schläuche mit den gegebenen Abmessungen sind für den Einsatz als Produktpipeline für submarine Meerwasserentsalzungsanlagen im Rahmen der während der Versuche gegebenen Bedingungen (Temperatur, Druckdifferenzen, äußere Einflüsse, etc.) tauglich.

5.2 Entwicklung von Komponenten

Für andere Komponenten submariner Anlagen wurden in Zusammenarbeit des Lehrstuhls für Apparatechnik und Anlagenbau mit auswärtigen Forschungsstellen und Firmen Konstruktionsvorschläge entwickelt, die als Anpassungs- bzw. Variantenkonstruktion auf der Verwendung handelsüblicher Halbzeuge und Armaturen aufbauen.

5.2.1 Modulsystem

In Zusammenarbeit mit dem Forschungsinstitut Berghof, Tübingen, wurde eine Studie über die Entwicklung des Membranteils einer submarinen Entsalzungsanlage erstellt [780_7]. Konstruktionsvorschläge für Systeme mit Membranen

geringer Filtrationsstromdichte (vgl. Abschnitt 4.2.1.1) sind in Bild 5.7 wiedergegeben. Bei diesen Systemen enden die Membranen bzw. Membranen und Stützkörper in Kunststoffblöcken, durch die über Stich- und Sammelkanäle das Permeat über einen miteingegossenen Stutzen in das Sammelrohrsystem gelangt.

5.2.2 Submarine Multikupplung

In Zusammenarbeit mit der Firma C. K. WALTHER, Wuppertal, wurde eine submarine Multikupplung entwickelt [81]. Diese Kupplung dient zum Trennen und Verbinden der medienführenden Leitungen und der elektrischen Starkstrom- und Steuerleitungen zwischen der submarinen Entsalzungsanlage und einer stationären Anlage am Meeresboden, von der aus die Produktpipeline und das Kabel zur Küstenstation führen. Beim Kupplungsvorgang wird die Kupplungsloshälfte durch ein akustisches Transponder Navigationssystem an die Festhälfte herangebracht. Die Ankupplung selbst, vom Schiff aus durch Unterwasserfernschseysteme überwacht, erfolgt mit Hilfe von Steuerdüsen. Durch den Einsatz der Kupplung soll eine vereinfachte und kostengünstigere Wartung der Anlage erreicht werden.

Einzelheiten dieser submarinen Multikupplung zeigen Bild 5.8 und Bild 5.9. Eine handelsübliche Mehrfachkupplung, die für submarine Verhältnisse umkonstruiert werden kann, zeigt Bild 5.10.

5.2.3 Entgasungssystem

Im Gegensatz zu Umkehrosmose-Landanlagen zur Meerwasserentsalzung, bei denen die im Meerwasser gelösten Gase und die Gasdurchlässigkeit der Membranen keine besonderen Probleme darstellen, muß den hiermit verbundenen Fragen bei

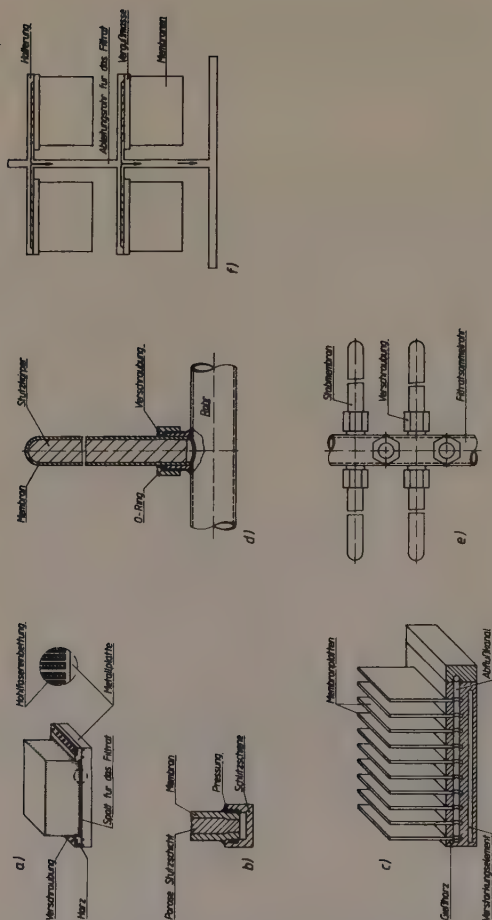


Bild 5.7: Modul-Systeme für submarine Meerwasserentsalzungsanlagen

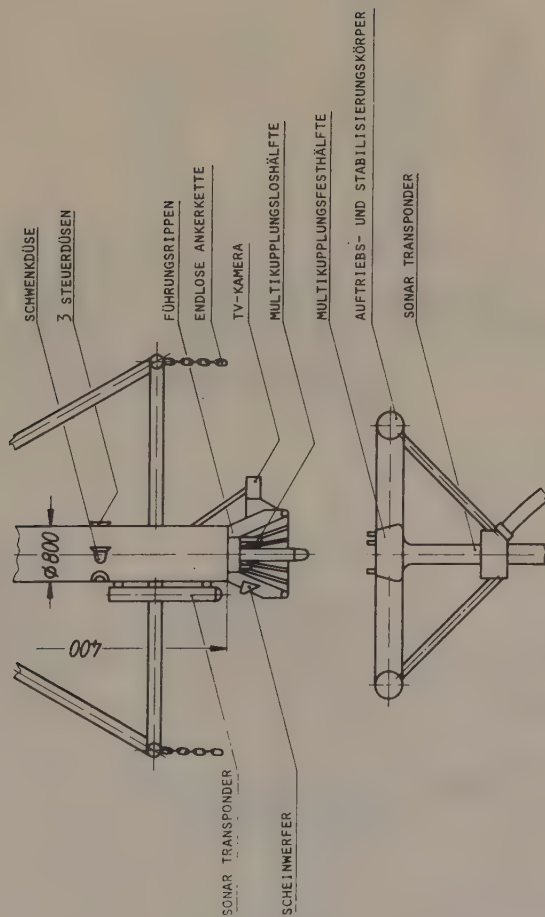


Bild 5.8: Submarine Multikupplung

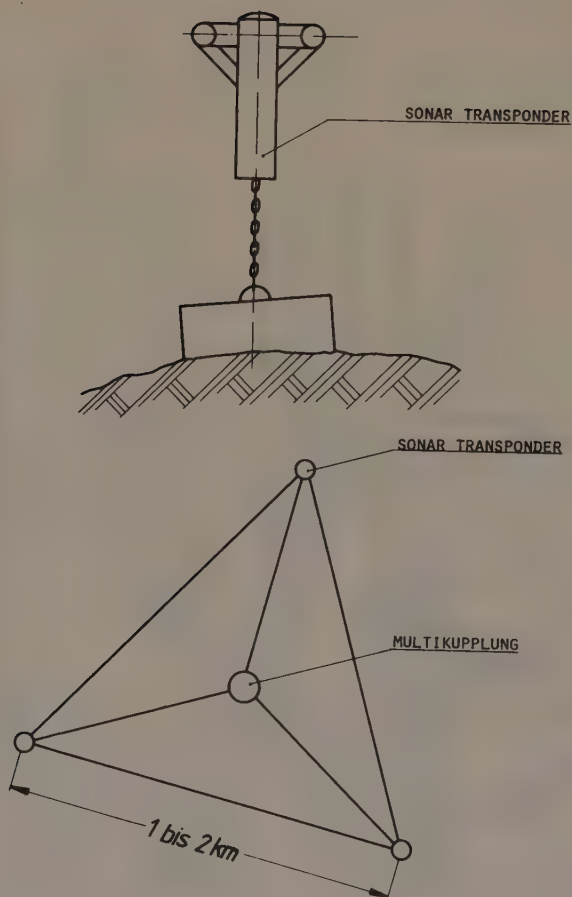


Bild 5.9: Anordnung der Sonar Transponder einer submarinen Multikupplung

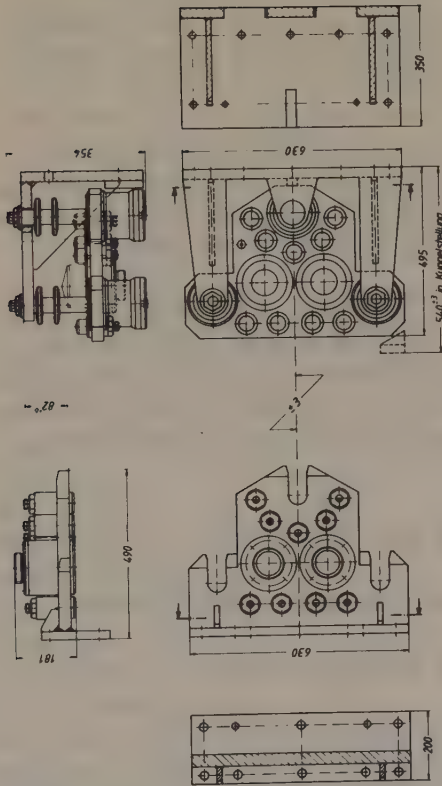


Bild 5.10: Handelsübliche 11-fach Kupplung
(Quelle: WALTHER KG)

11-fach Multi-Kupplung
mit hydraulischer Verriegelung

der Meerwasserentsalzung in submarinen Anlagen besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Hinzu kommt, daß die Membranen in submarinen Anlagen mit Meerwasser in einem Temperaturbereich von ca. 4 bis max. 15 °C beaufschlagt werden, in dem örtlich starke Übersättigungen an gelösten Gasen auftreten können [46], während in Landanlagen Meerwasser mit ca. 20 bis 30 °C entsalzt wird, dessen chemische und physikalische Eigenschaften leicht zu ermitteln und hinlänglich bekannt sind. Neben dem Einfluß der tiefen Temperaturen auf das Verhalten der Membranen und deren Gasdurchlässigkeit müssen deshalb bei der submarinen Entsalzungstechnologie besonders die Einflüsse der örtlich verschiedenen Gasgehalte im Meerwasser beachtet werden.

Ausgehend von der durch theoretische und experimentelle Untersuchungen [51, 74, 82] gestützten Annahme, daß beim Permeationsvorgang die im Tiefenwasser gelösten Gase auf der Produktwasserseite teilweise freigesetzt werden können, wurde ein Entgasungssystem in die Anlagenkonzeption miteinbezogen.

Für die Entgasung sind drei Lösungsmöglichkeiten denkbar:

- a) Gasbindung durch Druckerhöhung im Produktwassersammelbehälter;
- b) Entgasung über eine Entlüftungsleitung (vgl. Abschnitt 4.2.2.4);
- c) Entgasung über eine Abblasevorrichtung.

Die Gasbindung durch Druckerhöhung kann erst dann näher betrachtet werden, wenn genügend Erfahrungswerte über die Regelungsmöglichkeiten beim Betrieb submariner Anlagen und vor allem repräsentative Meßwerte über die Art und Menge der anfallenden Gase vorliegen. Diese Werte können jedoch hinreichend genau nur bei Langzeitversuchen unter realen Bedingungen ermittelt werden.

Die Verwendung einer Entlüftungsleitung für die Entgasung ist eine einfache, aber finanziell vergleichsweise aufwendige Lösung, da durch die offshorespezifischen Randbedingungen die Installation von zusätzlichen Komponenten notwendig wird (vgl. Abschnitt 4.2.2.4). Bei den ersten Versuchen unter realen Bedingungen wird jedoch eine Entlüftungsleitung verwendet werden müssen, um die für weitere Überlegungen der oben genannten Art notwendigen Meßwerte zu erhalten.

Für die Entgasung durch Abblasen der Gase in das eine submarine Anlage umgebende Meerwasser wurde eine Entlüftungsvorrichtung entwickelt.

Da der Druck in der Produktpipeline am Ausgang der Anlage beim Betrieb der Pumpe um den Betrag der Rohrleitungsverluste höher als der statische Druck in dieser Leitung und damit höher als der am Einsatzort vorherrschende hydrostatische Druck des Meerwasser ist (vgl. Abschnitt 4.2.2.2), kann der Überdruck zum Abblasen am Einsatzort benutzt werden. Bild 5.11 zeigt das Schema einer Abblasevorrichtung, bei der durch zyklisches Öffnen und Schließen der Ventile nach Maßgabe der anfallenden Gasmenge die Gase aus dem Produktwassersammelbehälter in einen davon getrennten Druckbehälter abgeführt und mittels Druckwasser aus der Produktpipeline aus dem Entgasungsbehälter diskontinuierlich abgestoßen werden. Bild 5.12 zeigt den Versuchsstand mit einem Modell, an dem die Funktion der Abblasevorrichtung überprüft werden konnte und Untersuchungen zu den Schaltzyklen durchgeführt wurden [74_7].

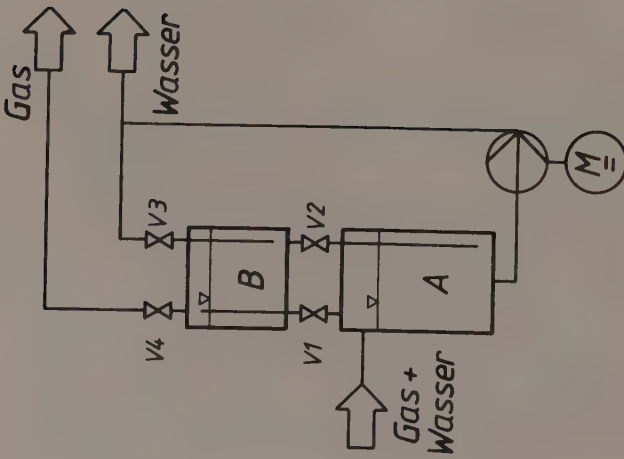


Bild 5.11: Schema einer Abblasevorrichtung

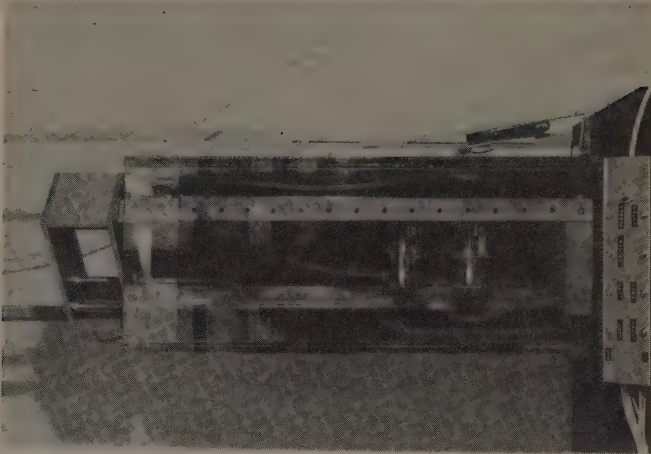


Bild 5.12: Versuchsstand mit Modell
der Abblasevorrichtung

6 Pilotanlage für submarine Umkehrosmose-Meerwasserentsalzung

Basierend auf der Konzeptentwicklung für submarine Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlagen (vgl. Abschnitt 4) und auf in diesem Zusammenhang erarbeiteten konstruktiven Vorschlägen wurde eine Pilotanlage entwickelt und gefertigt, die in einem praxisnahen Versuch in 500 bis 600 m Meerestiefe getestet werden sollte. Neben den theoretischen Erkenntnissen wurden bei der Konstruktion dieser Pilotanlage die Ergebnisse aus einer Reihe von Simulationsversuchen verwertet, denen die wesentlichen Komponenten und Elemente der Anlage unterzogen wurden. An dieser Entwicklung beteiligte sich die Firma Josef van Obergeren, Neuss, bei der die Anlage gefertigt wurde.

6.1 Konzeption der Pilotanlage

Bei der Konzeption der submarinen Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungs-Pilotanlage, die die Bezeichnung SUMEA 1 erhielt, wurde ein Pflichtenheft mit folgender Gliederung erstellt:

- 1) Zweckbeschreibung;
- 2) Anforderungsliste;
- 3) Komponenten- und Schnittstellenbeschreibung;
- 4) Liefer- und Leistungsanteileabgrenzung;
- 5) Zeitplanung.

Bei der Zweckbeschreibung wurde in Anlehnung an die oben erläuterten Funktionsbereiche einer submarinen Anlage (vgl. Abschnitt 4.2) auf eine konsequente funktionsorientierte Gliederung der Pilotanlage Wert gelegt. Gewählt wurde eine Unterteilung der Pilotanlage in Baugruppen, wobei die einzelnen Baugruppen folgende Funktionskomplexe umfassen:

- B1 : Produktwassergewinnungssystem;
- B2 : Produktwassersammler;
- B3 : Produktwasserfördereinheit;
- B4 : Rohwasserverteilersystem;
- B5 : Entlüftungssystem;
- B6 : Absenksystem;
- B7 : Meßsystem.

Die Zweckbeschreibung für die Baugruppen erfolgte ebenso in Anlehnung an die oben genannten Funktionsbereiche.

In der Anforderungsliste wurden unter anderem folgende Forderungen aufgestellt:

a) Apparativer Teil

- a.1) Die Baugruppen sind in ihren äußeren Abmessungen so zu dimensionieren, daß die gesamte Anlage für die Durchführung eines Außendruckversuches zur Gewinnung von Aussagen über Stabilität, Festigkeit und Dichtigkeit in der Druckkammer in Aachen (vgl. Abschnitt 5.1 und Bild 5.1) installiert werden kann.
- a.2) Die Behälter, Krümmer, Stutzen und Flansche sowie die entsprechenden Dichtungen des Apparates sind für einen Außendruck von 60 bar bei atmosphärischem Innendruck auszulegen.
- a.3) Die Gesamtanlage ist hinreichend steif zu bemessen, da die Anlage beim Transport sowie durch Seegang und Schlingerbewegungen beim Auf- und Niederbringen starken äußeren Kräften und Momenten unterworfen sein kann.
- a.4) Um die Durchleitung von Verbindungskräften durch die Dichtungen zu vermeiden, sind diese in den "Nebenschluß" zu verlegen.

- a.5) An der Anlage sollen mehrere Dichtungsarten erprobt werden.
 - a.6) Die im Inneren der Anlage angeordneten Aggregate sind aus nichtrostendem Material zu fertigen und müssen bis 60 bar, dem Druck in der Anlage beim größten anzunehmenden Störfall, druckbeständig sein.
 - a.7) Wegen der im Betrieb nicht zu vermeidenden Schlingerbewegungen und der beim Transport auftretenden Belastungen ist der vom Hersteller vorgeschriebenen radialen Abstützung der Pumpen besondere Aufmerksamkeit entgegen zu bringen. Die Abstützungen müssen von den Behälterenden aus gelöst werden können bzw. als Gleitabstützung ausgeführt werden, die axiales Herausziehen gewährleisten.
 - a.8) Die dem Meerwasser ausgesetzten Anlagenkomponenten sollten aus einem seewasserbeständigem Material gefertigt sein oder mit einem seewasserbeständigen Oberflächenschutz versehen werden. Kostenspezifische Gesichtspunkte (vgl. Pkt. a.9) sind zu beachten.
 - a.9) Bei der Auswahl aller Komponenten soll berücksichtigt werden, daß die Anlage wegen der nur begrenzt zur Verfügung stehenden Mittel nicht für einen Langzeitversuch konzipiert werden kann.
- b) Elektrischer Teil
- b.1) Die Energie-, Steuer- und Meßleitungen müssen mittels Steckverbindungen an geeigneten Stellen so trennbar sein, daß sowohl die Aggregate einzeln als auch die Anlage insgesamt unabhängig von der Hauptzuführungsleitung zu handhaben und zu transportieren sind.

- b.2) Alle bei der Energieversorgung und der Meß- und Regeltechnik im submarinen Teil der Anlage zu verwendenden Stecker und Kabel müssen für einen Außendruck von 60 bar geeignet und seewasserbeständig sein.
- b.3) Die Durchführungen von Energie-, Steuer- und Meßleitungen durch die Behälterwand müssen bei der Abdichtung des entsprechenden Gehäuses gegen die Behälterwand einem Differenzdruck von 60 bar standhalten und nach Befestigen der Stecker beidseitig bis 60 bar wasser- und druckdicht sein.
- b.4) Das Meßsystem, mit dem Temperaturen und Drücke in und an der Pilotanlage erfaßbar sein müssen, ist unter Verwendung handelsüblicher Komponenten zu erstellen und möglichst in die Anlage zu integrieren.
- b.5) Für die Auswertung der Meßsignale sind am Lehrstuhl vorhandene Geräte zu verwenden.
- b.6) Im Produktwassersammelbehälter ist eine Niveauüberwachungseinheit zu installieren (vgl. Pkt. a.6), über die eine kontinuierliche Überwachung des Wasserspiegels im Behälter ermöglicht wird. Gleichzeitig sollten in dieses System Schwimmerschalter für die Steuerung der Pumpen integriert sein, die als Trockenauslaufschutz bzw. Ausschalteinheit, bei genügender Füllhöhe als Einschalteinheit arbeiten.

c) Entsalzungsteil

- c.1) Für die Entsalzung des Meerwassers sind handelsübliche Module zu verwenden, die gegebenenfalls durch konstruktive Änderungen einer Kompaktbauweise (vgl. Pkt. a.1) angepaßt werden können.

- c.2) Für die Anbindung der Module an die submarine Anlage sollen nach Möglichkeit bei Umkehrosmose-Landanlagen übliche Apparateelemente Verwendung finden.
- c.3) Zur Gewährleistung der vom Modulhersteller für die Meerwasserentsalzung empfohlenen Mindestrohwassermenge ist ein Rohwasserverteilungssystem mit einer elektromotorisch angetriebenen Pumpe in seewasser- und entsprechend druckbeständiger Ausführung vorzusehen.
- c.4) Durch konstruktive Maßnahmen ist ein "Solekurzschluß", das Ansaugen des bereits aufkonzentrierten Meerwassers, zu verhindern.
- c.5) An der Anlage ist eine Vorrichtung vorzusehen, mittels derer vom Meerwasser am Eintritt in die Module und nach Verlassen der Module Proben genommen werden können.

Die Komponenten- und Schnittstellenbeschreibung wurde anhand der Anlagenstruktur nach Bild 6.1 und auf der Basis von Konstruktionsvorschlägen erstellt. Dabei fanden zum Teil bereits vorhandene Vorschläge (vgl. Abschnitt 4) Verwendung, nachdem sie entsprechend der Anforderungsliste überarbeitet waren. Einbezogen wurden in die Beschreibung alle für die Funktion wichtigen Komponenten aus den Bereichen Energieversorgung, Regeltechnik, Entlüftung und Produktförderung bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Anforderungen an Montage, Handhabung, Wartung und Reparatur. Die Ergebnisse werden hier nicht näher erläutert, da sie aus den Konstruktionsunterlagen hervorgehen oder in anderen Abschnitten abgehandelt werden.

Als Planungshilfe für die Abgrenzung der Liefer- und Leistungsanteile für die Pilotanlage SUMEA 1 wurde eine Matrix erstellt. Aufgetragen sind in den Spalten die einzelnen Baugruppen, in den Zeilen die zu beteiligenden Hersteller bzw. Anwender wie: Lehrstuhl für Apparatechnik

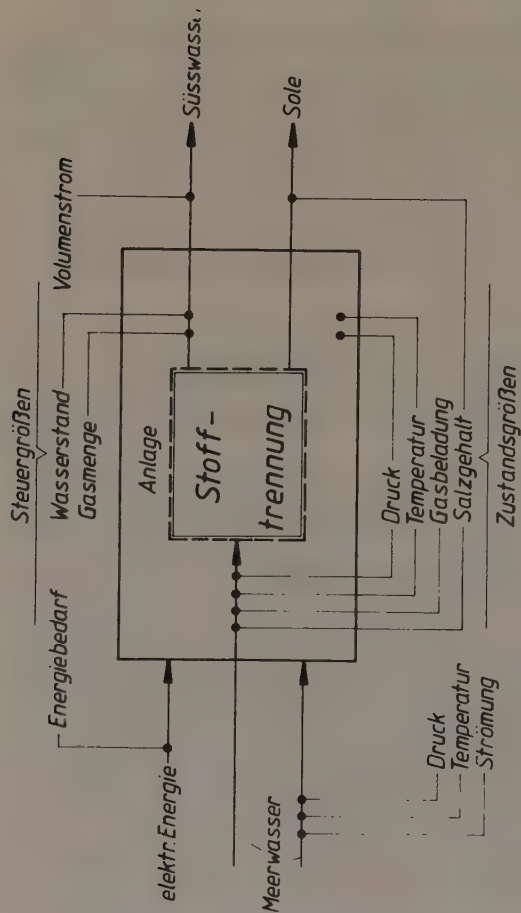


Bild 6.1: Anlagenstruktur einer Pilotanlage zur Sub-marinen Umkehrosmose-Meerwasserentsalzung

und Anlagenbau; Werkstatt des Lehrstuhls; Uni-Werkstatt als Abkürzung für die Zentralwerkstatt und die Elektronik-Werkstatt der Universität Erlangen-Nürnberg; Hersteller für den Hersteller des Apparates; Fertigungsbetrieb für Hersteller, von denen Komponenten beigestellt werden, die speziell für die submarine Anlage entwickelt werden; Lieferfirma für Firmen, die handelsübliche Komponenten zuliefern.

In der ersten Stufe wurden in der Hersteller/Baugruppen-Matrix die absehbaren und notwendigen Zuordnungen festgelegt (Tabelle 6.1).

Tabelle 6.1: Hersteller/Baugruppen-Matrix

Anwender Hersteller	Baugruppen						
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Lehrstuhl	X	X	X	X	X	X	X
Werkstatt Lehrstuhl			X		X	X	X
UNI-Werkstatt							X
Hersteller		X	X	X		X	
Fertigungsbetrieb			X	X		X	
Lieferfirma	X	X	X	X	X		X

Für die Angebotseinholung wurden die Baugruppenspalten in Spalten für die Einzelkomponenten untergliedert, so zum Beispiel die Baugruppe B3 "Produktwasserfördereinheit" in: Druckbehälter, Pumpe, Pumpenabstützung, Anschluß Energieversorgung, Pumpensteuerung und Anschlüsse Meßtechnik. Im Zuge der Lieferantenauswahl und Abgrenzung der einzelnen Leistungen wurden die entsprechenden Felder der Matrix dann mit dem Firmennamen belegt bzw. die Zuständigkeiten gekennzeichnet.

Die Zeitplanung erfolgte mit Hilfe einer Planungstafel, deren Kopfleiste horizontal in die Kalenderwochen, vertikal in die Baugruppen und deren Komponenten untergliedert war. Mit farbigen Magnet-Symbolen, die jeweils die aus einer

Zeile und einer oder mehreren Spalten resultierenden Felder abdeckten, konnte gekennzeichnet werden: Woche der Bestellung; Fertigungszeiten für Komponenten bei den Beteiligten in Erlangen; Fertigungszeiten für Komponenten bei auswärtigen Firmen; Woche der Lieferung und, als Kontrollfunktion, Fertigstellung bzw. Materialeingang.

Nach gleichem Schema entstand ein Terminplanungsbogen für Besprechungen, auf dem in der vertikalen Kopfleiste eine zusätzliche Spalte für die Nennung der Lieferfirma vorgesehen war. Die einzelnen Zeitmarken und Fertigungszeiten wurden hier durch Schlüsselbuchstaben und Pfeile symbolisiert.

Beide Planungshilfsmittel bewährten sich beim Ablauf des Projektes, da sie einen schnellen Überblick und Auffinden des kritischen Pfades sowie eine problemlose Umstellung bei Änderungen ermöglichten.

6.2 Konstruktion der Baugruppen

Ausgehend von den bei der Konzeption der Pilotanlage erarbeiteten Unterlagen und nach Überprüfung der Angebote sowie der Liefermöglichkeiten und -zeiten der einzelnen Herstellerfirmen wurde in der Entwurfs- und Auslegungsphase die im folgenden anhand der Baugruppen erläuterte Pilotanlage konstruiert (Bild 6.2). Die Entwürfe wurden jeweils mit dem Hersteller der Anlage diskutiert, um eine fertigungsgerechte Gestaltung zu erzielen, die Bauteilberechnungen zum Teil mit von dieser Firma für die Berechnung von Apparateteilen programmierten Regelwerken überprüft.

Die Berechnung für die unter Außendruck stehenden Apparateteile erfolgte gegen elastisches Einbeulen und gegen plastisches Verformen entsprechend den Vorschriften der AD-Merkblätter [83 bis 86]7.

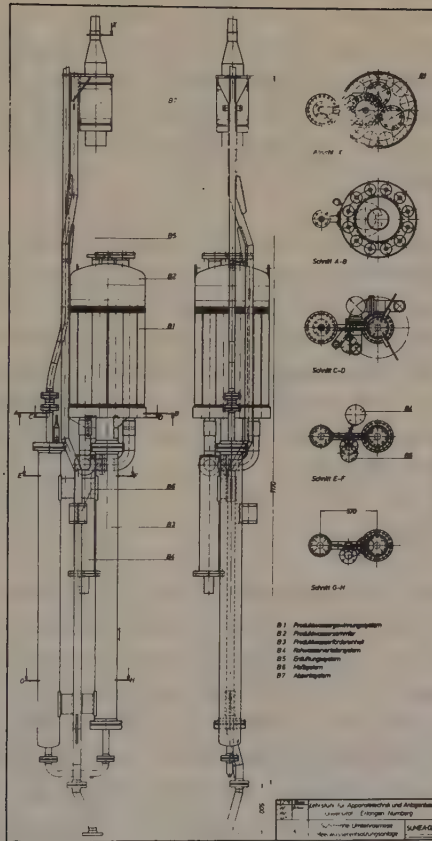


Bild 6.2: Submarine Umkehrosmose-Meerwasser-entsalzungs-Pilotanlage (SUMEA 1)

6.2.1 Produktwassergewinnungssystem

Für die einstufige Entsalzung von Meerwasser durch Umkehrosmose wurden Wickelmodule der Firma Fluid Systems, San Diego, vom Typ TFC 1501 PA ausgewählt (vgl. Bild 4.6). Ausgehend vom Außendurchmesser dieser Module und unter Berücksichtigung des größtzulässigen Durchmessers für den Süßwassersammelbehälter gemäß Punkt a.1 der Anforderungsliste (vgl. Abschnitt 6.1) wurde der Einbau von zwölf Modulen vorgesehen.

Für die Anbindung der Module an die Anlage wurde aus mehreren Konstruktionsvorschlägen nach Bild 6.3 eine Kombination aus Vorschlag III und V gewählt. Ein in die Kreisringplatte des Süßwassersammelbehälters eingeschweißtes Rohr bildet den Eingangsstutzen für das Produktwasser, ein innenseitig mit O-Ringen ausgerüsteter Interconnector die druckdichte Verbindung zwischen diesem Stutzen und dem Permeatrohr des Moduls.

6.2.2 Produktwassersammler

Die pilzähnliche Behälterform des Produktwassersammlers (Bild 6.4) ergab sich aus der erforderlichen Kompaktbauweise und der für die Anordnung und Anbindung der Module gewählten Konstruktion. Im Behälterdeckel sind der Anschlußstutzen für das Entlüftungssystem sowie zwei Stutzen für die Installation der Niveauschalter- bzw. der Niveauanzeigeeinheit angeordnet. Durch die Verwendung eines Blindflansches mit eingelassener Kabel-Schottdurchführung wurde in den letztgenannten Stutzen ein druck- und wasserdichter Raum geschaffen, in den eine kostengünstige, trennbare Kabelverbindung eingebaut werden konnte. Aus mehreren Vorschlägen wurde die Anordnung in Bild 6.5 rechts oben ausgewählt, um genügend Platz für das Einfüllen eines feuchtigkeitsabsorbierenden Mittels zu erhalten.

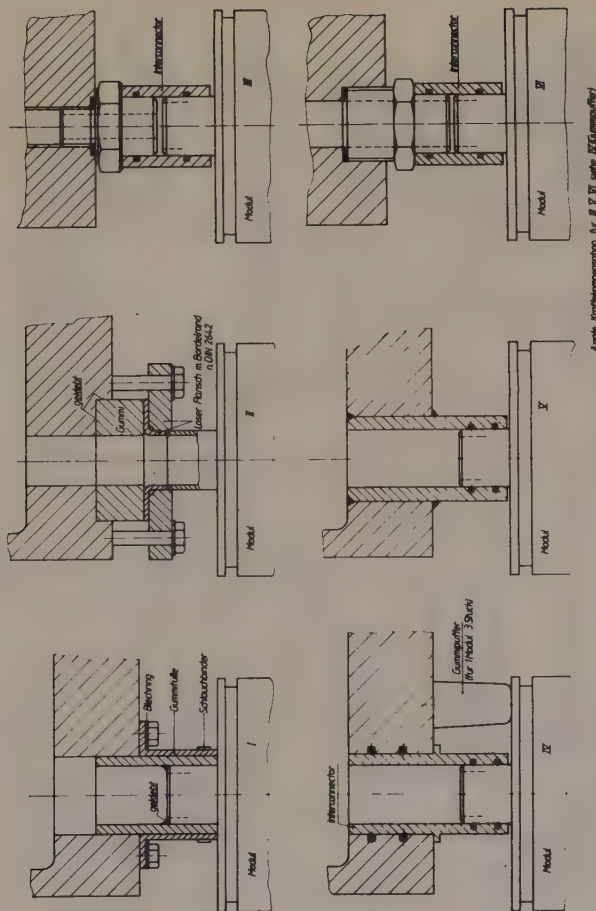


Bild 6.3: Verbindung Module-Produktwassersammler

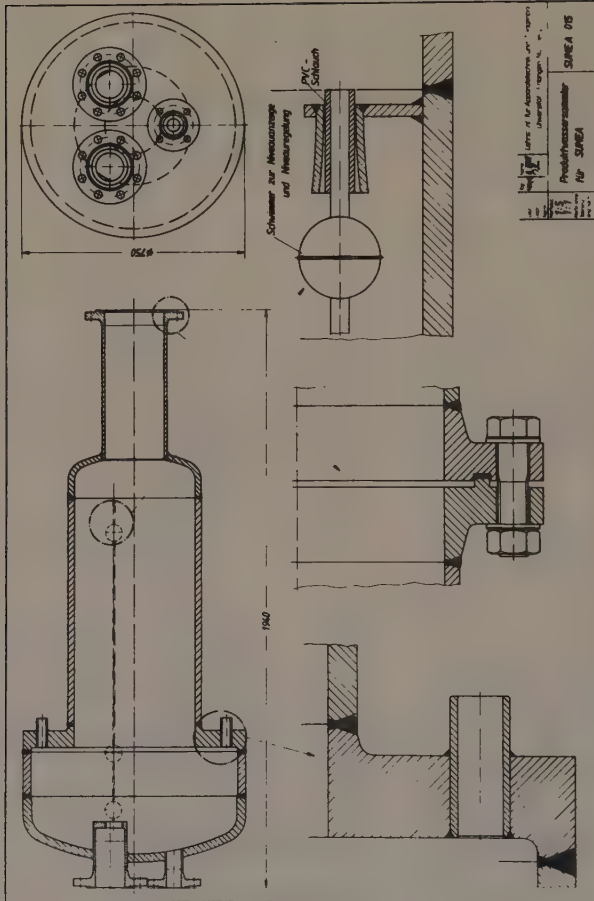


Bild 6.4: Produktwassersammler

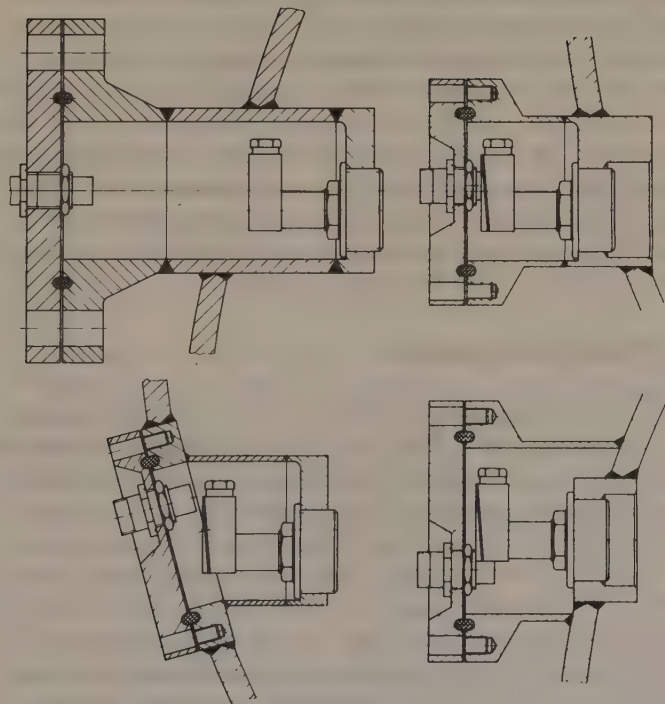


Bild 6.5: Stutzen für Niveauüberwachungseinheit

Die Niveauschaltereinheit, bestehend aus einer Tankverschraubung, einem daran angeschweißten unten geschlossenem Rohr, in dem sich die Schalter befinden, sowie den durch Klemmringe auf ihren Schaltweg eingestellten Schwimmern, wurde für drei Schaltpunkte ausgerüstet. Der obere Schwimmer schaltet über eine Automatik die Pumpen ein, der mittlere ist für den Betrieb einer geplanten Abblasevorrichtung vorgesehen, der untere Schwimmer schaltet die Pumpen aus. Bei der Niveauanzeigeinheit, die aus den gleichen Bauteilen besteht wie die Schaltereinheit, kann der Schwimmer die Gesamtlänge des Schaltrohres abfahren und gestattet so eine kontinuierliche Überwachung der Füllhöhe. Am Fuß des Schaltrohres ist ein zusätzlicher Schalter installiert, der redundant zum oben erwähnten Aus-Schalter als Trockenlaufschutz für die Pumpen vorgesehen ist. Diese Schaltereinheiten sowie ein zugehöriges Niveauanzeigegerät wurden von der Firma DELAVAL, Reichelsheim, bezogen.

6.2.3 Produktwasserfördereinheit

Die Permeatleistung der Module ist der Hauptparameter für die Auslegung der Pumpe der Produktwasserfördereinheit. Da jedoch keine Erfahrungen über das Verhalten der Membranen unter realen submarinen Bedingungen vorliegen (vgl. Abschnitt 5.2.3) und die Zustandsgrößen am Einsatzort erst bei einem Versuch exakt bestimmt werden können, wurde für die Permeatleistung der zwölf Module eine Prognose erstellt. Diese basiert auf den Angaben des Herstellers über den Temperatureinfluß auf die Permeatleistung, einem der Literatur [46, 87] entnommenen Temperaturspiegel für Meerestiefen um 600 m und einem variierten Betrag für die Leistungsminderung durch diverse Einflüsse. Die Prognose ergab ein Wertespektrum mit einer Streubreite von circa 30 %, ausgehend von einer maximal zu erwartenden Permeatleistung von $75 \text{ m}^3/\text{d}$, wobei auch dieser Wert selbst

als errechneter Mittelwert und dementsprechend mit Vorbehalt betrachtet werden muß. Ausgehend von diesen Werten und unter Einbeziehung konstruktiver Gesichtspunkte wurden für die Förderung des Produktwassers zwei Unterwasserpumpen der Firma PLEUGER, Hamburg, ausgewählt, die auf eine Förderhöhe von 300 m und eine maximale Förderleistung von $3,2 \text{ m}^3/\text{h}$ ausgelegt sind. Durch die bei diesen Pumpen gegebene Möglichkeit, eine Drosselung der Förderleistung bis auf 30 % der Nennleistung vornehmen zu können, wurde den zu erwartenden geringeren Werten für die Permeatleistung der Module Rechnung getragen.

Für die Pumpen, die wegen der vielstufigen und damit langen Bauweise nicht durch Biegemomente belastet werden dürfen (vgl. Abschnitt 6.1, Punkt a.7), wurde in Zusammenarbeit mit der Lieferfirma eine radiale Abstützung entwickelt (Bild 6.6).

Pumpe 1 wurde über Kopf eingebaut, Pumpe 2 in Normalstellung mit dem Motor als Fußteil, um die Kühlung der Motoren durch das vorbeiströmende Produktwasser zu gewährleisten. Die Konstruktion der Lager in der Pumpe und im Motor sowie die verwendeten Werkstoffe und Schmiersysteme lassen einen mehrjährigen wartungsfreien Betrieb der Unterwasserpumpen erwarten, wie vom Hersteller anhand zahlreicher Referenzanlagen belegt wurde.

Die Energiezufuhr für die Pumpen wurde unter Berücksichtigung der Anforderungsliste (vgl. Abschnitt 6.1, Punkte a.2, b.1) durch die platzsparende Konstruktion nach Bild 6.7 gelöst. Die Flansche wurden mit den oben erwähnten Programmen nach AD-Merkblatt B5/B8 berechnet und festigkeitsmäßig überprüft. Neben den Kräften, die durch das Gewicht der frei hängenden Pumpe auf das zentral angeordnete Produktrohr wirken, ist hier die Verschwächung des Deckels durch die Bohrungen und die Ausparung für die Kabel-Schottdurchführung mit einzubeziehen.

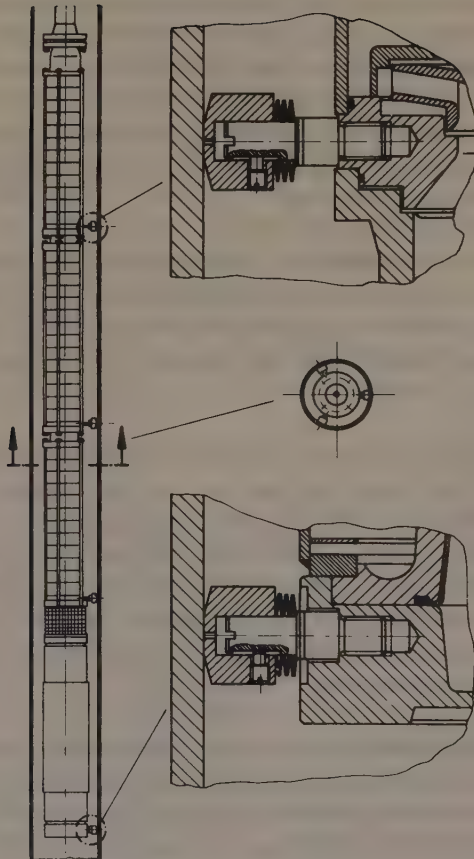


Bild 6.6: Radiale, federnde Pumpenabstützung

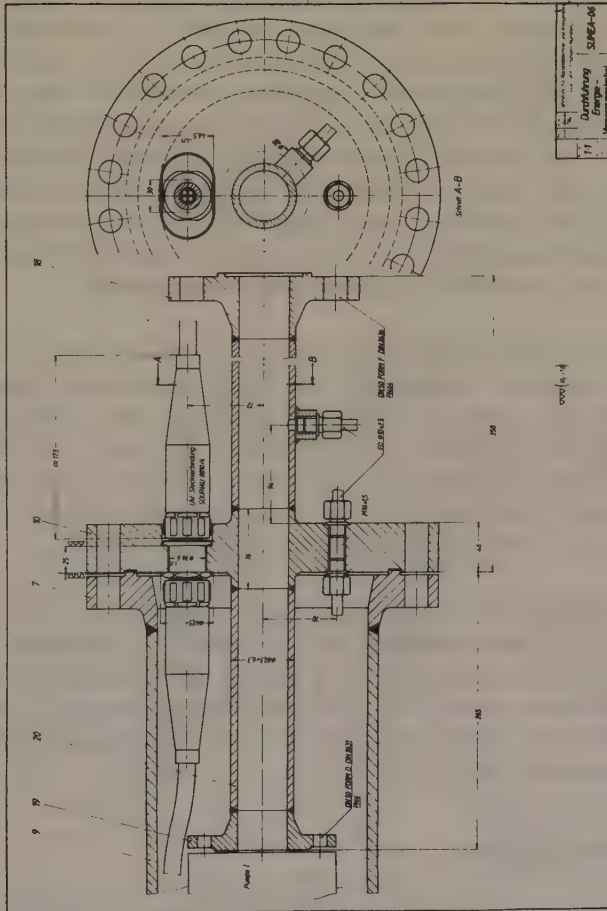


Bild 6.7: Durchführung Energieversorgungskabel

6.2.4 Rohwasserverteilersystem

Das Rohwasserverteilersystem (vgl. Abschnitte 4.2.1.1 und 6.1, Punkt c.3) wurde entsprechend Punkt a.1 der Anforderungsliste, unter Beachtung der iterativ vorausgerechneten Lage des Schwerpunktes im Apparat und im Hinblick auf die Modulmontage unterhalb der Module angeordnet. Das System besteht aus einem höhenverstellbaren Ringsammler, in dem die Module eingesetzt und dann zur Verbindung mit den Produktwasserstutzen insgesamt angehoben werden können, zwei lösbaren Verbindungsrohren zum Saugmantel, einer Unterwasserpumpe, die als Turbulatorpumpe bezeichnet wurde, und einem 8 m langen Kunststoffschlauch.

Beim Betrieb wird das Meerwasser mittels der Pumpe durch die Module gesaugt und die leicht aufkonzentrierte Sole über den Kunststoffschlauch unterhalb der Anlage abgeführt (vgl. Abschnitt 6.1, Punkt c.4). Durch die geringe Aufkonzentrierung dieser Sole und die weitläufige Vermischung, die durch die Meeresströmung begünstigt wird, sind keine ökologischen Schäden zu erwarten.

Die eingebaute seewasserbeständige Unterwasserpumpe, die aus den oben erwähnten Gründen über Kopf angeordnet und für eine Leistung von $30 \text{ m}^3/\text{h}$ bei 12 m Förderhöhe ausgelegt ist, wurde von der Firma PLEUGER, Hamburg, bezogen, die gleichfalls bei der Konstruktion des Saugmantels mitwirkte (Bild 6.8).

6.2.5 Entlüftungssystem

Als Entlüftungssystem für die Pilotanlage (vgl. Abschnitt 5.2.3) wurde ein RZD-Bündelrohr aus drei verseilten Edelstahlrohren $10 \times 0,5 \text{ mm}$ mit extrudiertem PVC-Mantel vorgesehen. Für den Anschluß des Bündelrohres an den Ent-

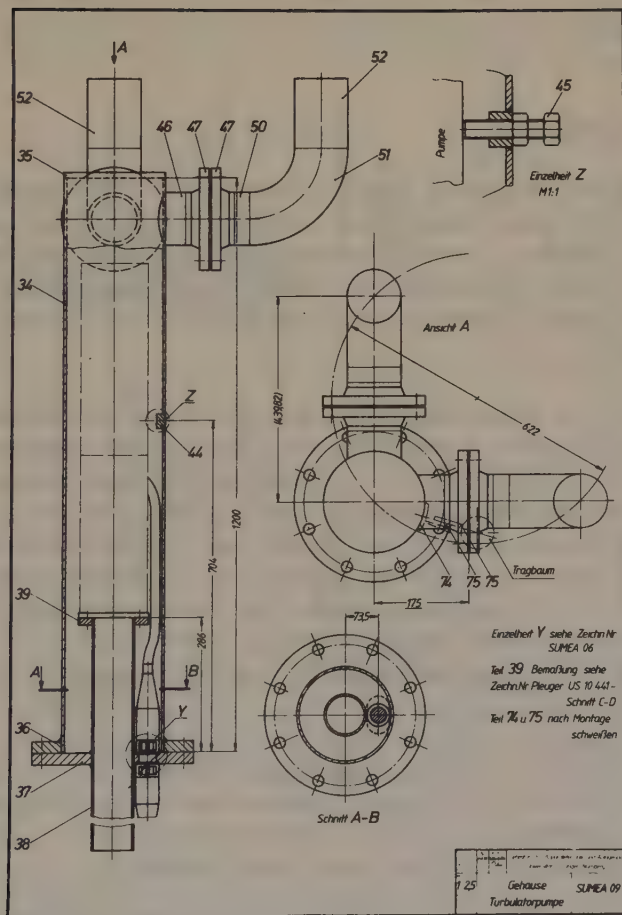


Bild 6.8: Gehäuse Turbulatorpumpe

lüftungsstutzen des Produktwassersammlers wurde das Anschlußstück nach Bild 6.9 und eine Arbeitsanleitung zur Herstellung einer druck- und wasserdichten Verbindung zwischen diesem Anschlußstück und dem Bündelrohr entworfen.

6.2.6 Absenksystem

Unter dem Begriff Absenksystem sind alle beim Ablassen der Pilotanlage notwendigen Komponenten zusammengefaßt, wie: Hebezeug, Energieversorgungskabel, Steuer- und Meßleitungen, Produktpipeline, Verbindungselemente Kabelenden/Behälteranschlüsse, und Hängevorrichtung für den Apparat.

Für die Energieversorgung der Pumpen und die Übertragung der Meß- und Steuersignale wurde von der Firma Norddeutsche Seekabelwerke AG, Nordenham, ein Unterwasserkabel mit doppelter Stahldrahtarmierung vorgeschlagen, in dem drei vieradrige Energiekabel und 47 Meßleitungen verseilt sind. Für das Kabel ist ein Gewicht von 68 kN/km und eine rechnerische Bruchlast von 190 kN angegeben; wegen des relativ geringen Gewichtes der Anlage von circa 15 kN wurde das Kabel deshalb als Hebezeug vorgeesehen.

Für die Herstellung der Verbindung zwischen diesem Kabel und den Elektroanschlüssen an der Pilotanlage wurde in Zusammenarbeit mit dem Kabelhersteller eine Junctionbox entwickelt, die aus drei Teilen besteht:

- a) einem Kabelanschlußflansch, in dem die einzelnen Kabel und Leitungen druckdicht eingegossen sind. Dieser Kabelanschlußflansch, in dem die Stahldrahtarmierung abgefangen ist, dient gleichzeitig zur Befestigung der Hängevorrichtung für den Apparat.

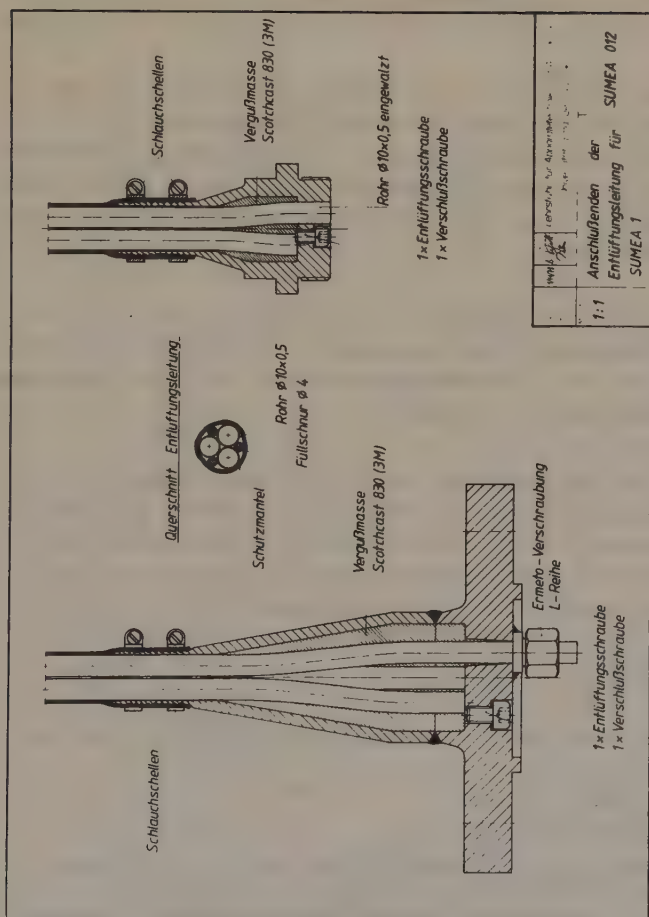


Bild 6.9: Anschlußstück Entlüftungsleitung

- b) Einem Steckerkabel-Anschlußflansch, in den die Kabel eingegossen sind, die über Unterwasserstecker an die einzelnen Schottdurchführungen angeschlossen werden. Diese Kabel, Unterwasserstecker und Schottdurchführungen wurden von der Firma SOURIAU, Düsseldorf, bezogen.
- c) Einem zylindrischen Hohlkörper (Bild 6.10), an dem diese beiden Anschlußflansche angeschraubt sind. In dem so entstandenen druck- und wasserdichten Raum werden die mit Steckern ausgerüsteten Kabel- und Leitungsenden, die aus den beiden Flanschen herausragen, zusammengesteckt.

Als Produktpipeline wurde ein PE-Hart-Rohr 50 x 4,6 mm der Firma HOEHN, Höhn, vorgesehen, dessen anlagenseitiges Ende mit einem Düsen-Rückschlagventil der Firma DEMAG MEER, Mönchengladbach, ausgerüstet ist.

Die Hängevorrichtung, an der der apparative Teil der Anlage befestigt ist und über die die Befestigung an der Junctionbox erfolgt, wurde unter Berücksichtigung der Lasteinleitung und der Schwerpunktlage konstruiert. Sie ist im folgenden mit Tragbaum bezeichnet (Bild 6.11).

6.2.7 Meßsystem

Das Meßsystem für die Pilotanlage SUMEA 1 sollte folgende Forderungen erfüllen:

- a) kostengünstige Lösung;
- b) Druckmessung: im Produktwassersammler, nach Pumpe 1, nach Pumpe 2 und in der Umgebung der Anlage;
- c) Temperaturmessung: im Produktwassersammler, am Motor der Pumpe 1, am Motor der Pumpe 2, in der Umgebung der Anlage und an der Meeresoberfläche;
- d) Überwachung der Rotationsbewegungen der Anlage beim Absenken und beim Verbleib in Absenktiefe;

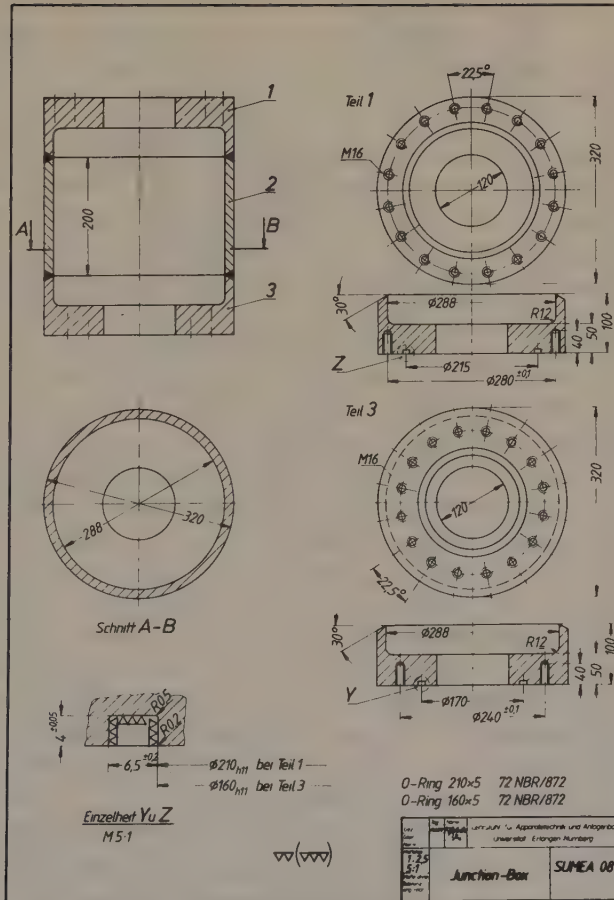


Bild 6.10: Junction-Box

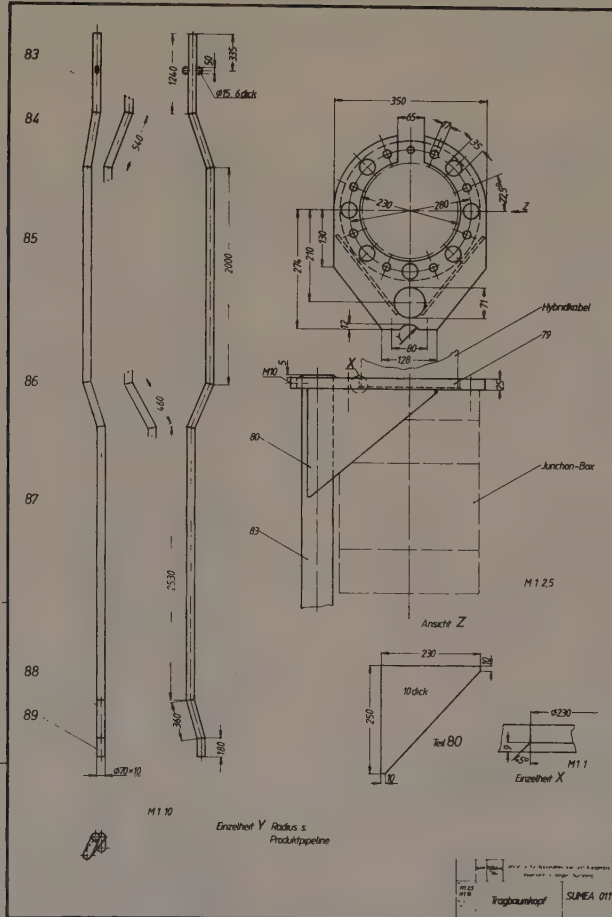


Bild 6.11: Tragbaum

- e) Entnahme von Proben des Meerwassers vor dem Eintritt und nach Verlassen der Module;
- f) kontinuierliche Überwachung der Füllhöhe der Anlage (vgl. Abschnitt 6.2.2);
- g) kontinuierliche Produktwasser-Mengenmessung;
- h) Messung der Stromaufnahme der Pumpenmotoren;
- i) Messung der Menge und der Zusammensetzung ausströmender Gase.

Ein Teil der Anforderungen konnte durch am Lehrstuhl für Apparate-technik und Anlagenbau vorhandene Meßgeräte abgedeckt werden. Für die weiteren Aufgaben wurden Geräte entwickelt, die die Bezeichnungen Meßsonde, Verdrillungs-Überwachungsvorrichtung, Meerwasserprobennehmer und Luft-meßrohr erhielten.

Die Meßsonde (Bild 6.12) besteht aus einem mit zwei Deckeln verschlossenem zylindrischen Hohlkörper und acht Verbindungsleitungen zu den einzelnen Meßstellen (Bild 6.13). Im Meßsondenbehälter sind Präzisionsdruckaufnehmer der Firma BURSTER, Gernsbach, installiert, auf die durch ERMETO-Rohre 10 x 1,5 mm der an den Meßstellen herrschende Druck wirkt. Die Durchführungen dieser Rohre durch die Behälterwandungen sind beidseitig lösbar und erfüllen so Punkt b.1 der Anforderungsliste. Für die Temperaturmessung sind in einem hierzu konstruierten Meßkopf aus Kupfer, der am Ende des jeweiligen ERMETO-Rohres eingeschraubt ist (Bild 6.14), Meßwiderstände eingelötet, die als Widerstandsthermometer arbeiten. Die ERMETO-Rohre dienen hier als Kabelschutzrohre; in ihnen werden die Meßleitungen, an den notwendigen Trennstellen durch Kleinst-Stecker trennbar, in den Meßsondenbehälter geführt. Im Behälter, der an den Tragbaum angeschraubt ist, sind diese Kabel sowie die Meßleitungen der Druckaufnehmer lösbar an zwei Kabel-Schott-durchführungen befestigt.

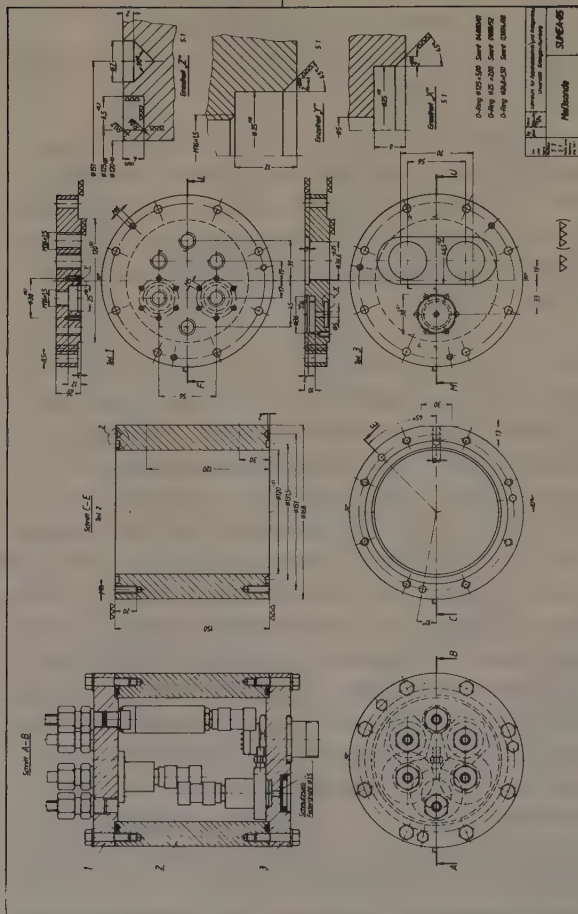


Bild 6.12: Messsonde

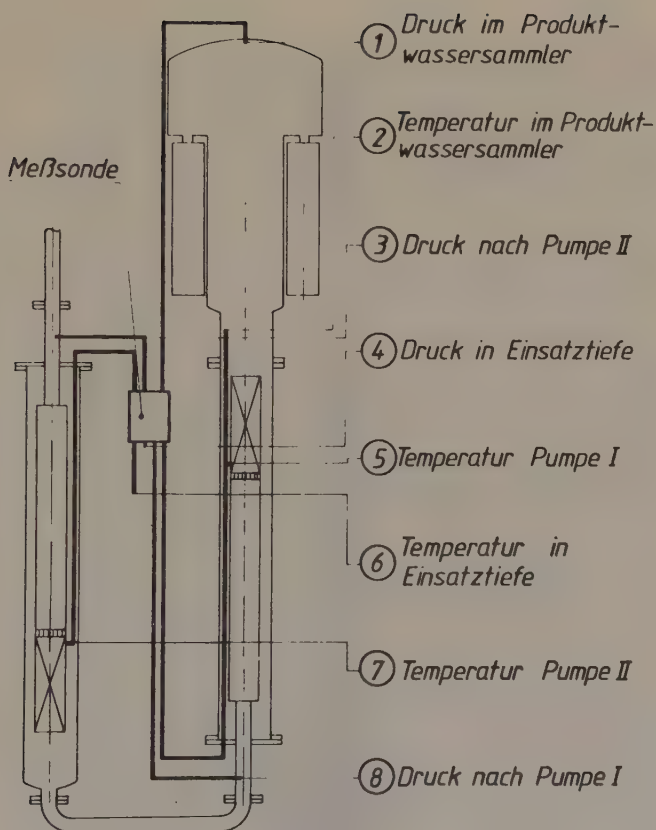


Bild 6.13: Kabelschutzrohre (Temperatur) und Meßleitungsrohre (Druck) der Meßsonde



Bild 6.14: Temperatur-Meßfühler

Da keinerlei Erfahrungen über das Verhalten eines sogenannten drallarmen Unterwasserkabels bei der üblichen Verwendung als einsträngiges Hebezeug vorlagen, wurde die Verdrillungsüberwachungsvorrichtung zur Kontrolle der Rotationsbewegungen der Anlage entwickelt. Sie besteht aus einem Unterwasserkompass von Digi COURSE, New Orleans, einem Drehwinkelmeßgerät und dem entsprechenden Verbindungskabel. Um magnetische Einflüsse von der Anlage her auszuschalten, ist der Unterwasserkompass in 2 m Entfernung von der Anlage auf einem Ausleger aus nichtmagnetischem Material montiert, der am oberen Ende des Tragbaumes angeflanscht ist. Die Rotationsbewegungen der Anlage werden im Kompass in drehwinkelabhängige Impulse umgewandelt, die über das Kabel zum Drehwinkelmeßgerät geleitet und dort ausgewertet werden. Das Drehwinkelmeßgerät, das in Zusammenarbeit mit der Elektronik-Werkstatt der Universität Erlangen-Nürnberg entwickelt wurde, ist mit einem programmierten Microprozessor ausgerüstet. Bei kurzfristigen Unterbrechungen der Zuleitung, die beim Umstecken notwendig sein könnten, werden die alten mit den neu erhaltenen Meßwerten verglichen und die augenblicklichen Meßwerte anhand einer Berechnung der Drehrichtungs- und Winkelgeschwindigkeitsdifferenzen während der Unterbrechung überprüft.

Für die Meerwasserprobenentnahme sind am Produktwassersammler im Einzugsbereich der Module und am Ausgang des Sole-Schlauches Stutzen vorgesehen, an denen jeweils ein zur Meeresoberfläche führender PVC-Schlauch befestigt wird. Da die Schläuche beidseitig offen sind, füllen sie sich beim Absenken der Anlage. Mittels zweier Pumpen, die als Saughöhe nur die Höhendifferenz zwischen der Bordwand des Versuchsschiffes und der Meeresoberfläche zu überwinden haben, wird so eine kontinuierliche Förderung des zu untersuchenden Meerwassers ermöglicht.

Als Luftmeßrohr ist ein Plexiglas-Profilrohr mit rechteckigem Querschnitt vorgesehen, in dessen Mittelteil eine leichtgängige, den Gesamtquerschnitt abdeckende Klappe eingehängt ist. Die Klappe zeigt die Strömungsrichtung des Gases an und gestattet über eine mit Rotametern geeichte Skala eine quantitative Zuordnung.

6.3 Untersuchungen an Komponenten für die Pilotanlage

Parallel zu den konstruktiven Arbeiten wurde bei der Entwicklung der Pilotanlage SUMEA 1 ein Versuchsprogramm durchgeführt, bei dem das Verhalten von Komponenten und zu verwendenden Bauelementen unter simulierten Einsatzbedingungen geprüft wurde.

In Zusammenarbeit mit der Firma Josef van Opbergen, Neuss, entstand eine Mehrzweck-Druckkammer (Bild 6.15) für den Test verschiedener Dichtungsarten, -formen und -werkstoffe. Im einzelnen wurde untersucht:

- a) die Anbindung der Module an den Produktwassersammler mittels Interconnectoren mit O-Ring-Abdichtung;
- b) die Dichtheit der vom Hersteller der Kabel-Schottdurchführungen empfohlenen Gestaltung der Durchbrüche durch die Behälterwandung bei Variation der Oberflächenbeschaffenheit an der Dichtstelle;
- c) das Dichtverhalten einer Flanschverbindung mit Nut und Feder unter Innen- und Außendruck bei Verwendung verschiedener Dichtungsarten, -formen und -werkstoffe und unter Variation der Oberflächenbeschaffenheit der Dichtungsfläche.

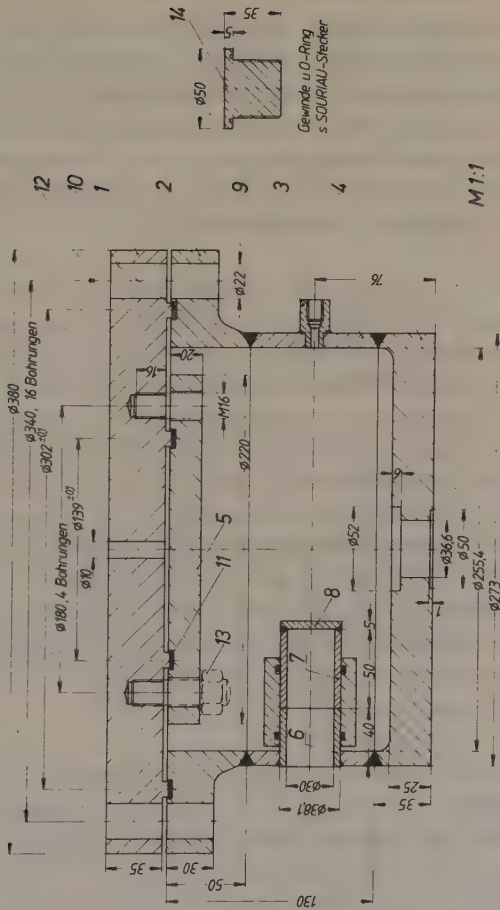


Bild 6.15: Mehrzweck-Druckkammer

Die Versuche ergaben, daß die für die Pilotanlage ausgewählten Dichtungen unter den beim Versuch gegebenen Bedingungen tauglich sind.

In einer am Lehrstuhl für Apparate- und Anlagenbau gefertigten Druckkammer wurde bei einem Außendruck von 100 bar die Dichtheit der Temperaturmeßfühler (vgl. Abschnitt 6.2.7) und der ERMETO-Verschraubungen sowie die Abdichtung zwischen den Druckaufnehmern und den Meßsondenbehälterdeckeln überprüft. Die Versuchsreihen ergaben die Tauglichkeit der gewählten Konstruktionen.

Rohrproben $10 \times 0,5$ mm aus dem RZD-Bündelrohr wurden bis zum Kollabieren mit Außendruck beaufschlagt. Die senkrecht in der Druckkammer angeordneten Rohre wurden am oberen, offenen Ende mittels einer ERMETO-Verschraubung im Druckkammerdeckel befestigt, das untere Ende mit einem Stopfen mit O-Ring abgedichtet. Innen wurde das Rohr mit Wasser gefüllt, um an Veränderungen des Wasserspiegels Undichtigkeiten und Verformungen feststellen zu können. Die Proben kollabierten explosionsartig bei Drücken zwischen 170 und 190 bar. Da der maximal zu erwartende Außendruck bei 60 bar liegt, ist trotz zusätzlich möglicher dynamischer Beanspruchungen die Sicherheit gegen Beulen noch so groß, daß das Bündelrohr für den Einsatz als Entlüftungsleitung tauglich ist.

Proben des im Meßsystem zu verwendenden ERMETO-Rohres $10 \times 1,5$ mm wurden in der Druckkammer mit 250 bar Außendruck beaufschlagt; es konnten keine Veränderungen des Innenvolumens der Rohre festgestellt werden.

Da bei der geplanten Absenktiefe die Reißlängen einzelner Leitungen überschritten werden und es zu erwarten ist, daß sich die Leitungen beim Absenken unkontrolliert umeinanderlegen, ist die Befestigung aller Leitungen am

Unterwasserkabel notwendig. Um den Zeitaufwand für den Absenk- und Aufholvorgang gering zu halten, sollte diese Verbindung sehr schnell hergestellt und sehr schnell gelöst werden können. Abgehend von konstruktiv und finanziell aufwendigen Klemmvorrichtungen wurden für diese Aufgabe Kabelbinder aus Polyamid vorgesehen, die über verzahnte Binderschlösser schnell geschlossen und durch Schneiden sehr schnell getrennt werden können.

Auszüge aus dem Protokoll über Zugversuche mit drei Kabelbindertypen sind im folgenden wiedergegeben:

	Typ I	Typ II	Typ III
Zugversuch: (Zugkraft F in Newton)			
F in N	1180, 1190, 1210	660, 652, 660	260, 258, 253
Reißversuch: (Zugkraft F in Newton)			
F in N	1580, 1150, 1045	840, 745, 712	308, 332, 420

Beim Reißversuch, bei dem die Kabelbinder in geschlossenem Zustand zwei Messing-Dorne $\varnothing$ 25 mm umspannten, gaben bei den oben aufgeführten Werten die Verzahnungen nach. Type I wurde für genügend fest erachtet und für den Einsatz beim Absenken vorgesehen.

7 Versuche mit der Pilotanlage

7.1 Ausrüstung eines Meßwagens

Für die Durchführung von Versuchen mit der Pilotanlage wurde ein einachsiger Baustellenwagen zum Meß- und Laborwagen umgerüstet. Dieser Bauwagen sowie einige Meßgeräte wurden von der Firma Mannesmann Anlagenbau AG zur Verfügung gestellt.

Die Grundausrüstung des Meßwagens umfaßt: Arbeitstisch; Eisschrank; zweiteiliger Spind; Regal für die Dokumentationsmittel, wie Video-System, Super-8-Kamera und Zubehör sowie für die transportsichere Lagerung anderer Zubehöreile und Hilfs-Meßgeräte; eine große Werkzeugkiste, die gleichzeitig als Sitzgelegenheit für Arbeiten am Tisch, am gegenüberliegenden Meßschrank und am Pumpensteuerungskasten dient; Stahlschrank mit Zubehör für das Video-System und eine Büro-Grundausrüstung; Elektroanschlußleisten.

Ein 19"-Meßschrank, über Schwingungsdämpfer stoß- und schwingungssicher mit dem Grundrahmen des Wagens verschraubt, wurde mit folgenden Einschüben bestückt:

- a) Drehwinkelmeßgerät der Verdrillungsüberwachungsvorrichtung, zweifach (vgl. Abschnitt 6.2.7);
- b) Zwölf-Kanal Comprecorder, Firma PHILIPS, Kassel, zur Dokumentation der von den Meßstellen Nr. 1 bis 12 gemäß Meßprotokoll nach Bild 7.1 übertragenen Meßwerte;
- c) Sechs-Kanal Trägerfrequenzverstärker, Firma Hottinger & Baldwin, Darmstadt, für den Anschluß der Präzisionsdruckaufnehmer;
- d) Infrarot-Gasanalysator (vgl. Abschnitt 6.2.7);
- e) Niveauanzeigegerät (vgl. Abschnitt 6.2.2);

... für ...
... ..

Versuchsprotokoll S U M E A

lfd.Nr.	Zeit	Dat.	Ort	Name	Bemerkungen

Nr.	Meßstelle	Ort/Messung	Anzeige in	Meßwert	Bemerkungen
1	PIR 201	Druck Sammelbehälter	bar		
2	PIR 202	Druck hinter P1	bar		
3	PIR 203	Umgebungsdruck	bar		
4	PIR 204	Druck hinter P2	bar		
5	TIR 101	Temperatur vor P1	°C		
6	TIR 102	Temperatur P1	°C		
7	TIR 104	Temperatur P2	°C		
8	TIR 105	Umgebungstemperatur SUMEA	°C		
9	TIR 106	Umgebungstemperatur Wasseroberfläche	°C		
10	LIR 303	Füllhöhe Sammelbehälter	ℓ		
11	FQI 301	Durchfluß Meßrohr	m ³ /h		
12	SUMEA	Stellung SUMEA Ausleger	Umdr.		
13	SUMEA	Salzgehalt unterl. }	ℓ		
14	SUMEA	Salzgehalt oberh. }	ℓ		
15	Meßrohr Luft	CO ₂ in der Entlüftung	ℓ		
16	Meßrohr Wasser	O ₂ im Permeat	ℓ		
17	ID-Steuerger.	Leistung P1	A		
18	"	Leistung P2	A		
19	"	Leistung P3	A		
20	"	Spannung Bordnetz	V		
21	Meßrohr Luft	Stellung der Wollfäden	-		
22	Wetterstation	Schiff, Luftdruck	mm Hg		
23	"	Schiff, Temperatur	°C		
24	"	Schiff, Feuchte	ℓ		
25	A-Ausleger	Schiff, Um d. d. Kabelrolle	Umdr.		1 Umdr. = 6,86m

Bild 7.1: Meßprotokoll

- f) Anzeigegerät, zweifach, für die induktive Durchflußmeßeinrichtung, Firma Fischer & Porter, Göttingen;
- g) Einschub mit Arbeitsplatte und Schublade für Reserveeinschübe und Meßprotokolle für den Comprecorder;
- h) Schubladen für Meßgerätezubehör.

Die Pumpensteuerung, ausgeführt als anschlußfertige, isolierstoffgekapselte ID-Steuerung in Kastenbauform der Firma Klöckner-Moeller, Nürnberg, ist neben einem Voltmeter und drei Amperemetern mit Druckknöpfen für EIN und AUS sowie mit Leuchtmeldern für BETRIEBSBEREIT, BETRIEB und STOERUNG für jede der drei Pumpen ausgerüstet. Durch einen Steuerschalter kann der Betrieb auf HAND oder AUTOMATIK (vgl. Abschnitt 6.2.2) eingestellt werden, wobei Pumpe 2 erst nach Anlaufen von Pumpe 1 über eine Einschaltverzögerung zugeschaltet wird.

Für die Wasseranalyse wurde ein tragbares Wasserlabor mit Leitfähigkeitsmeßgerät der Firma GROVE, München sowie analysentechnische Hilfsvorrichtungen vorgesehen.

Eine Grundplatte an der Außenwand des Meßwagens dient der Montage des Luftmeßrohres (vgl. Abschnitt 6.2.7) und der als Wassermeßrohr bezeichneten Einheit, bestehend aus induktivem Durchflußgeber, Probennehmerhahn, zwei Absperrventilen und Anschluß an die Meßzelle eines Sauerstoffanalyzers.

Die Verbindungsleitungen vom Meßwagen zur Anlage bzw. beim Offshoreversuch zu den Winden, wie Meßleitungskabel, Energieversorgungskabel und Schläuche für Wasser und Luft, stellte die Firma Mannesmann Anlagenbau AG zur Verfügung.

7.2 Simulationsversuche

Unterstützt durch die Firma Josef van Opbergen, Neuss, wurde in der Fertigungshalle ein Kreislauf aufgebaut, der der Durchführung von Simulationsversuchen diene.

a) Aufgabenstellung

- Funktionstest der Pumpen sowie der meß- und regeltechnischen Einrichtung;
- Leistungstest der Pumpen zur Erstellung von Pumpen-, Temperatur- und Leistungskennlinien unter variierten Belastungen;
- Überprüfung der Meßtechnik nach längerem Betrieb;
- Sammeln von Erfahrungen über das Betriebsverhalten der Anlage.

b) Versuchsapparatur

Pilotanlage SUMEA 1 mit der Meß- und Regelinstrumentierung nach Bild 7.2; Meßwagen; Verbindungskabel; Rohrkreislauf mit Kugelhahn als Drosseleinrichtung; Wasserschlauch; Manometer.

c) Versuchsaufbau

Über das Meßleitungskabel und die Pumpenkabel wurde die Verbindung von der Junctionbox (vgl. Abschnitt 6.2.6) zum Meßwagen hergestellt. Vom Ausgangsstutzen der Pumpe 2 führte ein Druckrohr zu einem Hochdruckkugelhahn, der an das Wassermeßrohr (vgl. Abschnitt 7.1) angeflanscht war. Vor und hinter diesem Kugelhahn sowie am Ausgangsstutzen von Pumpe 1 wurden Manometer für eine Sichtüberprüfung angeschlossen. Ein Wasserschlauch führte vom Abgang des Wassermeßrohres zur Anlage zurück, wobei das Wasser wahlweise in den Produktwassersammler oder in einen Abfluß zum örtlichen Abwassernetz geleitet werden konnte.

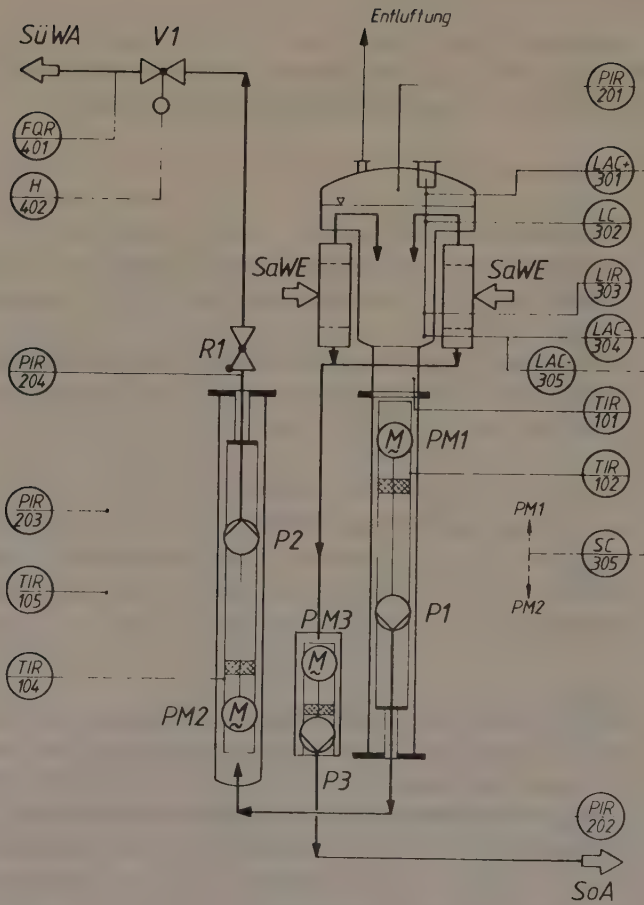


Bild 7.2: Verfahrensfließbild SUMEA

d) Versuchsdurchführung

d.1) Überprüfung Meßtechnik

Vor dem Einbau der Temperaturmeßfühler und der Druckaufnehmer in die Anlage wurden die Meßleitungen unter Einbeziehung des Meßleitungskabels und der Steckverbindungen überprüft und die entsprechenden Signale am Comprecorder und einem Digitalvoltmeter mit vorher erstellten Eichkurven verglichen. Bei der Eichung der Temperaturmeßfühler wurde ein Quecksilberthermometer und ein Thermostat verwendet, die Eichkurve der Druckaufnehmer wurde mit Hilfe einer Hochdruckpumpe mit Feinmanometer und einer Druckkammer (vgl. Abschnitt 6.3) erstellt.

Bei den im folgenden beschriebenen Versuchen wurde mittels des Kugelhahnes der Durchfluß gedrosselt und durch den sich aufbauenden Druck im Rohrkreislauf die Arbeitsbedingungen für die Pumpen unter submarinen Bedingungen simuliert.

d.2) Funktionstest

Die Anlage wurde mit Wasser gefüllt und die Pumpensteuerung auf AUTOMATIK geschaltet. Bei einem Wasserzufluß von $2 \text{ m}^3/\text{h}$ wurde während mehrerer Schaltzyklen die Funktion der Pumpen sowie der Niveauschalter- und -anzeigeeinheit überprüft.

d.3) Kreislaufversuche

Die Anlage wurde gegen geschlossenen Schieber angefahren und dann durch Veränderung des Hahn-Stell-

winkels auf verschiedene Meßpunkte im Bereich kleiner Durchflüsse eingestellt. Das Wasser floß nach Verlassen des Wassermessrohres in den Produktwassersammler zurück.

d.4) Durchlaufversuche

Bei den Durchlaufversuchen wurde die Wasserversorgung über einen Feuerwehrschauch und mit Hilfe einer verstellbaren C-Spritze sichergestellt, die Entsorgung durch Ableiten des Wassers in das Abwassernetz. Die Durchflußmenge durch das Druckrohr wurde über einen weiten Wertebereich variiert, wobei die Versuche für jeden eingestellten Durchflußwert 20 Minuten dauerten, um einen Angleich der Motortemperaturen an den durchflußspezifischen Temperaturgrenzwert zu erreichen.

d.5) Kreislaufversuch Turbulatorpumpe

Am Ausgangsstutzen wurde ein Manometer, ein Drosselventil und der Soleschlauch (vgl. Abschnitt 6.2.4) angeschlossen, der in den Ringsammler führte. Die Turbulatorpumpe wurde eingeschaltet und der Durchfluß soweit gedrosselt, daß sich am Manometer der dem Druckverlust durch die Module entsprechende Druck aufbaute. Die Durchflußmenge wurde nicht gemessen, da genügend Datenblätter des Herstellers zur Verfügung standen.

e) V Versuchsergebnisse

- e.1) Die Pumpen, die Pumpensteuerung, die Niveauregelung und die Niveauanzeige arbeiteten störungsfrei.
- e.2) Die Meßtechnik arbeitete störungsfrei und ohne Veränderungen nach einer zehnstündigen Betriebszeit.

e.3) Aufgrund der Meßprotokolle konnten anhand der untersuchten Meßpunkte die Pumpen-, Temperatur- und Leistungskennlinien für die Anlage bei den unter den beim Versuch gegebenen Randbedingungen gezeichnet werden (Bild 7.3).

e.4) Der spezifische Energiebedarf der Pumpen bei 600 m simulierter Förderhöhe beträgt circa $3,2 \text{ kWh/m}^3$, wobei die Strömungsdruckverluste in der Leitung nicht berücksichtigt sind.

f) Schlußfolgerung

Die untersuchte Pilotanlage ist im Rahmen der während der Versuche gegebenen Bedingungen für den Einsatz als apparativer, maschinen- und meßtechnischer Teil einer submarinen Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlage tauglich. Hierbei sind sowohl die oben aufgezeigten Testergebnisse und Meßwerte berücksichtigt, als auch die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen an Einzelkomponenten und die technischen Angaben der Hersteller zu den nicht untersuchten Komponenten.

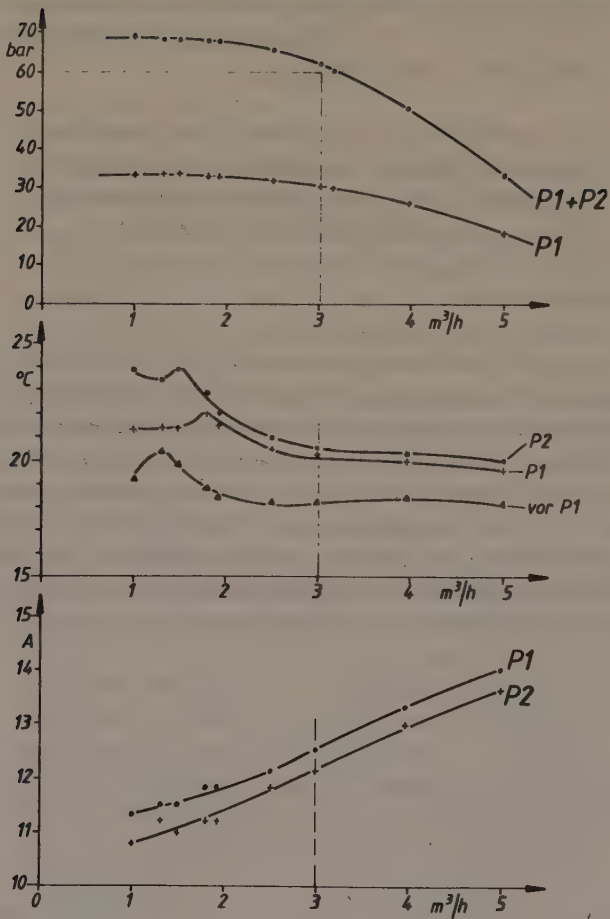


Bild 7.3: Pumpen-, Temperatur- und Leistungskennlinien der Simulationsversuche

7.3 Offshoreversuch

Nach dem erfolgreichen Abschluß der Simulationsversuche wurde durch die Zusammenarbeit des Lehrstuhls für Apparatechnik und Anlagenbau und den Firmen Josef van Opbergen und Mannesmann Anlagenbau AG die Durchführung eines Versuches mit der Pilotanlage SUMEA 1 unter realen Bedingungen ermöglicht.

7.3.1 Absenkvorrichtung

Das Absenken einer Anlage auf 600 m Meerestiefe mit mehreren Leitungen und unter Verwendung eines Unterwasserkabels als Hebezeug stellt an die Absenkvorrichtung Anforderungen, die von den in der Seekabelverlegung üblichen Geräten und Vorrichtungen nicht erfüllbar scheinen. Deshalb mußte eine Absenkvorrichtung für folgende Aufgabenstellung entwickelt werden: die Arbeitseinheit muß drei Leitungen, die einzeln aufgetrommelt sind, über eine Seilscheibe kontrolliert ab- und auftrommeln. Die Seilscheibe ist so hoch anzuordnen, daß die Pilotanlage mit Hilfe eines Kranes an die Junctionbox am Ende des Unterwasserkabels eingehängt und befestigt werden kann, und dabei so hängt, daß der Fuß der Anlage in einer Ebene mit dem Fußrahmen der Absenkvorrichtung verbleibt.

Die prohibitiv hohen und im Rahmen eines Pilotversuches nicht vertretbaren Kosten für eine Spezialwindeneinheit führten zur Konzeption der in Bild 7.4 und Bild 7.5 abgebildeten Absenkvorrichtung, die unter Verwendung handelsüblicher, gebrauchter Seilwinden und eines Seitenauslegers aus dem Pipelinebau gefertigt wurde. Da durch eine Keilform eine gezielte Führung der drei abzusenkenden Leitungen ermöglicht wird, wurde für die Fertigung der Seilscheibe ein Winkeleisen 150 x 14 mm verwendet. Den Durchmesser der Seilscheibe bestimmte der zulässige Mindestbiegeradius für



Bild 7.4: Absenkvorrichtung



Bild 7.5: Absenkvorrichtung mit Ausleger

das Unterwasserkabel von $20 \times$ Außendurchmesser D_a , einem Mittelwert zwischen den vom Kabelhersteller empfohlenen Richtwerten für den Mindestbiegeradius von $25 \times D_a$ für häufiges Ab- und Auftrommeln und $15 \times D_a$ für einmaliges Abtrommeln.

Bei der Berechnung der Traversen und der Lastangriffspunkte an die Traversen und den Ausleger wurden statische und dynamische Kräfte berücksichtigt. Ausgehend von einem an der Seilscheibe wirkenden Gewicht von maximal 60 kN für die auf 600 m abgesenkte Anlage und die Leitungen unter Abzug der Auftriebskräfte, wurde für seegangsbedingte dynamische Kräfte der dreifache Wert angenommen. Zur Begrenzung dieser dynamischen Kräfte wurde der Ausleger am Fußrahmen der Windeneinheit angelenkt und zur Dämpfung ein Schwingungstilger vorgesehen. Dieser Schwingungstilger, der bei Zugkräften von 80 kN anspricht und bis maximal 120 kN dämpfen kann, wurde in die Zugvorrichtung zwischen der Traverse an der Windeneinheit und dem Ausleger eingebaut (vgl. Bild 7.8).

Um zu vermeiden, daß das Unterwasserkabel beim Einlaufen in die Seilscheibe die Produktpipeline oder die Entlüftungsleitung einklemmt, wurde im oberen Teil des Auslegers ein Querträger mit einer Führungsrolle für die letztgenannten Leitungen montiert.

Die Begehbarkeit des Auslegers wurde durch im üblichen Leitersprossenabstand aufgeschweißte Rohre sichergestellt.

Zum Absichern und aus Sicherheitsgründen wurde an den drei Trommeln neben der vorhandenen Windenbremse eine Feststellvorrichtung montiert, mit der die Trommeln in fast jedem Drehwinkel schlagartig blockiert werden konnten.

Um das Auf- und Abladen für den Transport sowie die Montage an Deck zu vereinfachen und sicher zu gestalten,

wurde eine Verladetraverse konzipiert, mit der alle beim Offshoreversuch zu verwendenden Komponenten mit einem einsträngigen Hebezeug bewegt werden können (Bild 7.6). Zur Erhöhung der Sicherheit wurden ebenso die einzelnen Komponenten erst austariert, bevor das Anschweißen der Transportflaschen erfolgte.

7.3.2 Versuchsschiff

Für den Offshoreversuch wurde der Hochseeschlepper WRESTLER (Bild 7.7) der Firma Union de Remorquage et de Sauvetage, Antwerpen, gechartert. Das Schiff ist 52 m lang, wobei das 19 m lange, nahezu aufbautenfreie Heck genügend Platz für die Aufstellung der Winden und des Meßwagens bietet, verfügt über genügend Unterkünfte für Begleitpersonal und ist mit einem 380 V-Bordnetz genügender Leistung ausgerüstet.

Für die Befestigung der Absenkvorrichtung und des Meßwagens wurde auf dem Heck ein Grundrahmen aufgeschweißt, der wiederum mit dem Fußrahmen der Absenkvorrichtung und des Meßwagens verschweißt wurde (Bild 7.8). Am Heck wurde eine Arbeitsbühne und ein Stützrohr zur Befestigung des Tragbaumfußes (vgl. Abschnitt 7.3.6) angeschweißt. In der Arbeitsbühne wurde mittig eine zweiteilige Platte mit einem zentral angeordneten Führungsrohr mit trompetenrohrähnlichen Rändern angeordnet (Bild 7.9). Nach Absenken der Anlage bis unterhalb dieser Arbeitsbühne und Aufrichten des Auslegers sowie Einschwenken der Leitungen auf Absenkstellung, wurde nach Anschrauben der hinteren Platte so eine gezielte und seegangsunabhängige Seilführung für das weitere Absenken geschaffen.



Bild 7.6: Verladetraverse



Bild 7.7: Hochseeschlepper WRESTLER



Bild 7.8: Schiffsheck mit aufgeschweißter
Absenkvorrichtung

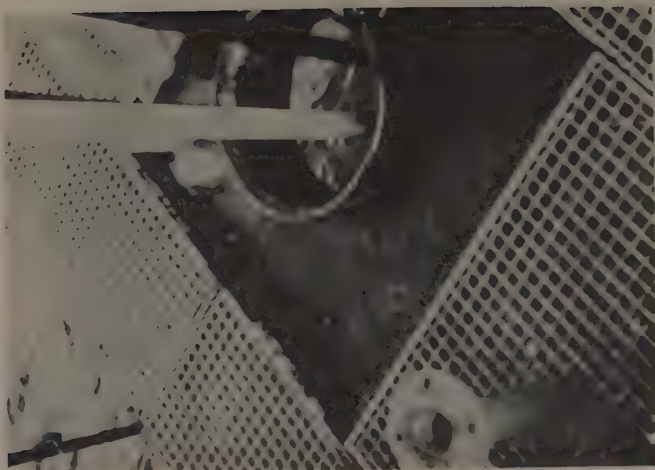


Bild 7.9: Arbeitsbühne am Heck

7.3.3 Durchführung des Offshoreversuches

Die Durchführung des Offshoreversuches wurde für den 14. bis 20. September 1979 festgelegt und als Einsatzort die Position $37^{\circ} 6'$ nördliche Breite und $1^{\circ} 32'$ westliche Länge 13 sm OSO vor Garrucha (Bild 7.10) südspanische Küste in der Nähe von Almeria. Diese Lokation wurde gewählt:

- hier fällt der Meeresboden steil ab und erreicht 3 sm vor der Küste 600 m Meerestiefe, 6 sm vor der Küste 1000 m;
- von Antwerpen aus ist dies der am nächsten gelegene Punkt im Mittelmeer, in dem sich die Tiefenströmungen aus der Straße von Gibraltar nicht mehr auswirken;
- Nähe des Flughafens von Almeria;
- Nähe des Hafens von Almeria für eventuelle Notfälle.

a) Aufgabenstellung

In einem Versuch sind mit einer submarinen Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungs-Pilotanlage offshore und unter realen Bedingungen folgende Punkte zu untersuchen:

- Funktionsnachweis der submarinen Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungstechnologie;
- Ansätze zum Nachweis der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens;
- Messungen an der Entlüftungsleitung in Zusammenhang mit dem Verhalten von Gasen beim submarinen Entsalzungsprozeß;

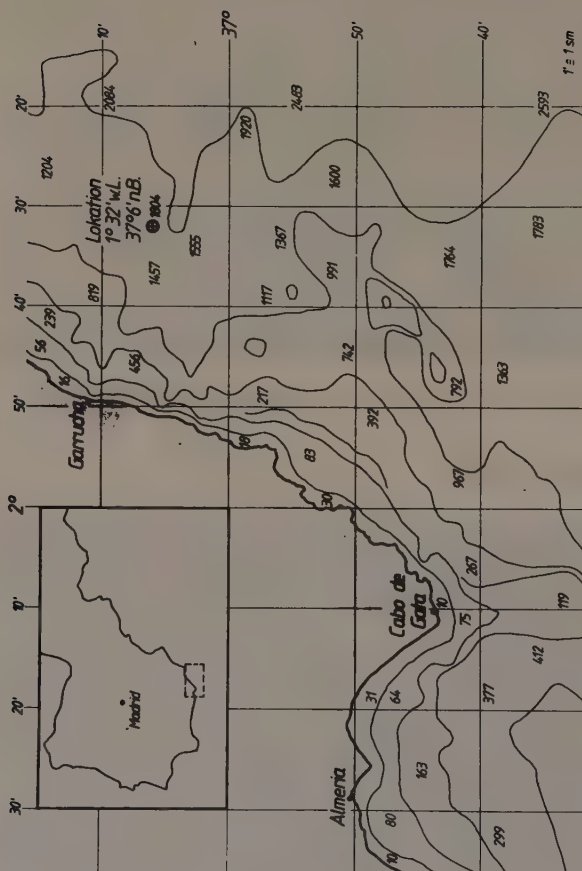


Bild 7.10: Lokation Offshoreversuch

- Verhalten eines Unterwasserkabels bei der Verwendung als einsträngiges Hebezeug;
- Anforderungen an Montage, Handhabung und Instandhaltung einer submarinen Entsalzungsanlage unter Offshore-Bedingungen.

b) Versuchsapparatur

Pilotanlage SUMEA 1; Meßwagen; Absenkvorrichtung; Verbindungskabel und -rohre; umgerüsteter Hochseeschlepper.

c) Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau für den Offshoreversuch ist in vier Abschnitte aufzugliedern:

c.1) Vorbereitung beim Hersteller der Anlage in Neuss

Nach der Fertigstellung der Winden und der Durchführung eines Funktionstests wurden das Unterwasserkabel, die Produktpipeline und die Entlüftungsleitung aufgetrommelt und an dem jeweilig am Trommelkern gelegenen Ende die Anschlußstücke für die Herstellung einer Verbindung zum Meßwagen montiert. Die Produktpipeline wurde so weit als möglich mit Wasser gefüllt, um die verfahrensbedingten Anforderungen an diese Leitung zu erfüllen.

c.2) Vorbereitung im Hafen von Antwerpen

Am Heck des Versuchsschiffes wurde eine Arbeitsbühne installiert. Nach der Montage des Meßwagens und der Absenkvorrichtung auf dem Deck des Versuchsschiffes wurde das Unterwasserkabel über die Seilscheibe gezogen und die Pilotanlage über den Tragbaum und die

Junctionbox daran befestigt. Bei diesen Arbeiten wurde ein Riß an der Welle zwischen dem Motor und dem Getriebe der Trommel des Unterwasserkabels festgestellt, woraufhin ein neuer Motor installiert werden mußte.

Die Produktpipeline und die Entlüftungsleitung wurden über die Führungsrolle und die Seilscheibe gezogen und am Fuß des Auslegers befestigt. Anschließend wurden alle Motoren und der Meßwagen seedicht verpackt, die Pilotanlage und die einzelnen Leitungen seefest verzurrt.

c.3) Vorbereitungen in der Nähe des Einsatzortes

Bedingt durch Schlechtwetterverhältnisse mußte das Versuchsschiff für zwei Tage in eine Bucht einlaufen. Dort wurden auf ruhiger See die Produktpipeline und die Entlüftungsleitung an die Pilotanlage angeschlossen, der Ausleger mit dem Unterwasserkompass montiert und die Module eingebaut, die bis dahin unter den vom Hersteller vorgeschriebenen Bedingungen in seefesten Kisten gelagert waren. Das Meßkabel für die Verdrillungsüberwachungsvorrichtung wurde abgetrommelt und in Schleifen auf das Deck gelegt.

c.4) Vorbereitungen am Einsatzort

Am Einsatzort wurden das Meßkabel am Kompass und die Meerwasserprobennehmerschläuche an den entsprechenden Stützen an der Anlage befestigt.

d) Versuchsdurchführung

Nach eingekehrter Wetterberuhigung wurde das Versuchsschiff auf Position gelegt und die Anlage abgesenkt.

Neben dem Unterwasserkabel, der Produktpipeline und der Entlüftungsleitung, die über die Seilscheibe liefen, wurden das Meßkabel der Verdrillungsüberwachungsvorrichtung und die zwei Meerwasserprobennehmerschläuche durch das Führungsrohr in der Arbeitsbühne abgelassen. Die Absenkschwindigkeit wurde über die Sicherheitsbremse des Windenantriebes der Unterwasserkabeltrommel geregelt, die beiden anderen Trommeln liefen frei mit. Mittels der Kabelbinder (vgl. Abschnitt 6.3) wurden alle Leitungen in ~ 6 m Abständen am Unterwasserkabel befestigt, alle ~ 3 m die zwei Probennehmerschläuche und das Meßkabel an der Entlüftungsleitung.

Beim Absenkvorgang wurde mit Hilfe der Verdrillungsüberwachungsvorrichtung die Richtung und die Zahl der Umdrehungen der Anlage laufend beobachtet. Alle 100 m wurde der Absenkvorgang unterbrochen, die Verbindung vom Unterwasserkabel zum Meßwagen gesteckt und das Meßprogramm auf dem Comrecorder durchgefahren. Bei 550 m Meerestiefe war die vorgegebene erste Versuchstiefe erreicht und die Pilotanlage wurde gemäß dem Kabel- und Steckverbindungsplan nach Bild 7.11 an den Meßwagen angeschlossen. Wegen eines technischen Defektes, der durch eine Fehlschaltung beim Anschluß des Energieversorgungssystems der Pilotanlage an das Bordnetz verursacht wurde, konnten die Pumpen nicht in Gang gesetzt werden.

Der Versuch wurde abgebrochen und die Pilotanlage wieder eingeholt. Beim Aufholen wurden die Windenantriebe eingesetzt, wobei nur das Unterwasserkabel unter Spannung stand. Die Antriebe für die Trommeln der beiden anderen Leitungen dienten nur zum Auftrommeln.

Die Kabelbinder wurden ohne Unterbrechnung des Aufholvorgangs mit Seitenschneidern gekappt. Während das Meßkabel der Verdrillungsüberwachungsvorrichtung in Schleifen an Deck verlegt werden konnte, wurde der Aufholvorgang nach jeweils 50 m unterbrochen, um die Meerwasserprobennehmerschläuche von Hand aufzutrommeln.

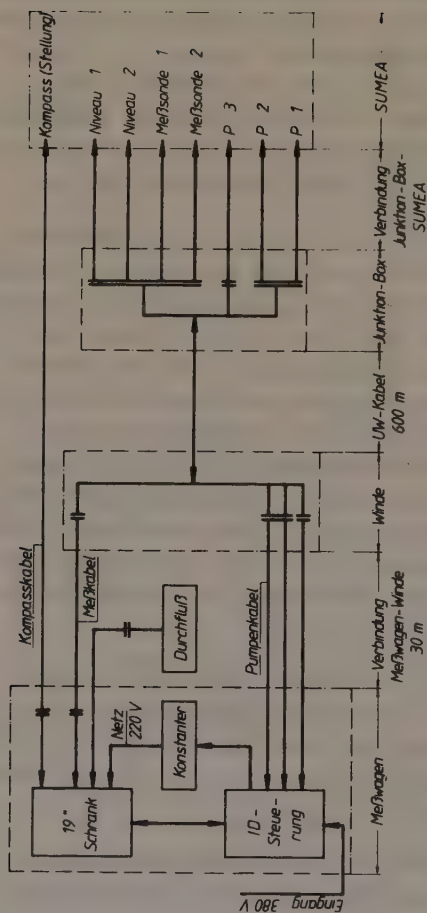


Bild 7.11: Kabel- und Steckverbindungsplan

Im Hafen von Almeria wurden die aufgrund des technischen Defektes durchgebrannten Unterwasserstecker (Bild 7.12) und Schottdurchführungen gegen kurzfristig eingeflogene Ersatzteile ausgewechselt.

Beim Füllen der Pilotanlage zur Durchführung eines Funktionstests nach erfolgter Reparatur meldete die Niveauanzeige einen konstanten, unrealistischen Wert für die Füllhöhe im Produktwassersammler. Beim Ausbau der Niveauanzeigeeinheit zeigte sich, daß der Schwimmer kollabiert war (Bild 7.13).

Beim Funktionstest war an den Produktwasserstutzen der Pilotanlage eine Meßeinheit angeflanscht, bestehend aus einem Manometer und einem Drosselschieber. Die Pumpen wurden einzeln gegen den geschlossenen Schieber angefahren und förderten jeweils gegen 30 bar am Drosselschieber, bis der Trockenlaufschutz der Niveauschaltereinheit ansprach. In der zweiten Testphase wurden beide Pumpen eingeschaltet, wobei sie diesmal gegen 60 bar am Drosselschieber förderten.

Nach nochmaligem Durchmessen der einzelnen Kabel mit befriedigendem Befund wurde die Durchführung eines zweiten Offshoreversuchs vorbereitet.

Beim zweiten Absenkversuch wurde bei 400 m Absenktiefe festgestellt, daß der Isolationswert zwischen den einzelnen Adern der Energieversorgungskabel weit unter dem zulässigen Grenzwert lagen, was auf einen Wassereintrich in die Steckverbindungen schließen ließ. Da eine kurzfristige Reparatur beziehungsweise ein Auswechseln der Steckverbindungen gegen selbst anzufertigende provisorische Verbindungsstücke nicht möglich war, wurde der Versuch abgebrochen und das Versuchsschiff nach Antwerpen beordert.



Bild 7.12: verschmorter Stecker



Bild 7.13: kollabierter Schwimmer

e) Versuchsergebnisse

- e.1) Das für die Handhabung der Absenkvorrichtung, der Pilotanlage und der Leitungen für den Absenk- und Aufholvorgang entwickelte Konzept nebst Arbeitsablaufbeschreibung wurde konsequent durchgeführt und bei Windstärke 2 bis 3 und langer Dünung störungsfrei realisiert.
- e.2) Die Absenkvorrichtung arbeitete beim Absenken und Aufholen der Pilotanlage störungsfrei.
- e.3) Aufgrund der Meßprotokolle konnten anhand der beim Absenken der Pilotanlage erhaltenen Meßergebnisse (vgl. Abschnitt 7.3.3, Punkt d) Kurven für die Temperatur- und Druckverläufe in und an der Pilotanlage gezeichnet werden (Bild 7.14). Dabei wurde der schon vor Ort beobachtete Umstand bestätigt, daß ein Teil der vom Comprecorder aufgezeichneten Meßwerte tendentiell richtig aber wertemäßig zu hoch oder zu niedrig lagen. Dies betrifft die Werte für den Druck und die Temperatur im Produktwassersammler sowie den Druck nach Pumpe 2. Unregelmäßigkeiten im Bereich bis circa 350 m Absenktiefe weisen die Werte auf, die vom Comprecorder für den Druck hinter Pumpe 1 und die Temperatur am Motor der Pumpe 2 protokolliert wurden.
- e.4) Nach Erreichen der vorgegebenen Absenktiefe konnten die Pumpen wegen eines technischen Defektes im Energieversorgungssystem nicht programmgemäß in Betrieb genommen werden. Während eine kurzfristige Funktion von Pumpe 1 nicht nachweisbar ist, konnte dies für Pumpe 2 anhand der Leistungsaufnahme während kurzer Probelaufe festgestellt werden. Wegen des Anspre-

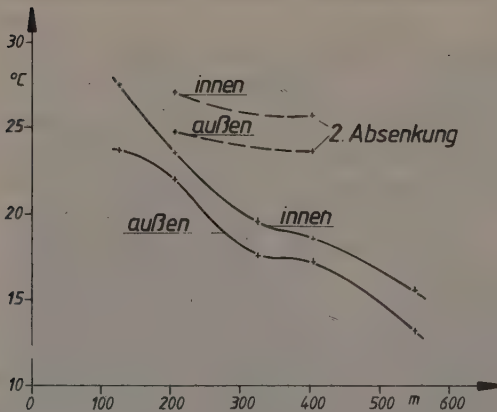
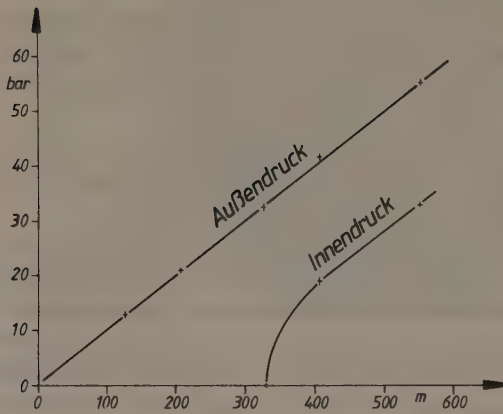


Bild 7.14: Temperatur- und Druckverläufe beim Offshoreversuch

chens des Motorschutzrelais wurden die Versuche jedoch nach kurzer Zeit eingestellt.

- e.5) Die Verdrillungsüberwachungsvorrichtung arbeitete kontinuierlich und zeigte für die Rotationsbewegungen der Pilotanlage auf das Basis positiver Daten im Uhrzeigersinn die Werte nach Tabelle 7.1 an:

Absenktiefe in m	Rotationsbewegung in Umdrehung absolut
20	+ 0,1
100	- 0,3
200	- 0,8
300	- 1,4
400	- 1,8
550	- 2,4

Tabelle 7.1: Ergebnisse Verdrillungsüberwachung

- e.6) Eine Kontrolle nach dem Aufholen der Pilotanlage ergab, daß die Hohlräume in der Junctionbox, der Meßsonde und den Stutzen für die Steckverbindungen der Niveauschalter- und Niveaumanzeigeneinheit am Produktwassersammler trocken waren.
- e.7) Während der Reparaturarbeiten an der Pilotanlage im Hafen von Almeria wurden Wasserproben an den Entnahmestellen gemäß Bild 7.15 gezogen. Bei allen Proben wurden über deren Leitfähigkeit die Werte für den Gesamtsalzgehalt als NaCl-Äquivalent gemessen (vgl. Bild 7.15), bei einigen Proben weitere Analysen vorgenommen (Tabelle 7.2). Wegen der Möglichkeit erheblicher Meßfehler aufgrund ungenügender Analyseneinrichtungen und der in Abschnitt 7.3.3, Punkt f.1.3 erläuterten Randbedingungen sind diese Werte jedoch mit Vorbehalt zu betrachten.
- e.8) Nach dem Auswechseln der Steckverbindungen für die Energieversorgung der Pumpen im Hafen von Almeria

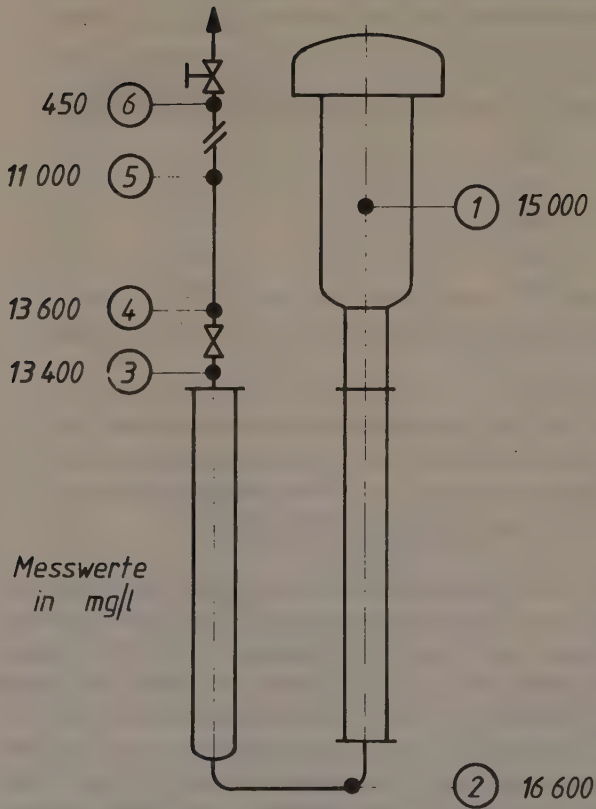


Bild 7.15: Probenentnahmestellen und zugehörige Werte für den Gesamtsalzgehalt als NaCl-Äquivalent

Probenentnahme- stelle Nr.	Leitfähigkeit in $\mu\text{S}/\text{cm}$	Oberflächen- wasser- Lokation	1	2	3	4	5	6
mg Na Cl/l (Leitfähigkeitsäquivalent)		36000	27000	32600	24000	24400	18200	920
Gesamthärte (CaCO_3) in mg/l		14000	1560	3120	-	-	810	390
Karbonathärte (CaCO_3) in mg/l		8500	380	440	-	-	410	360
Nichtkarbonathärte (CaCO_3) in mg/l		5500	1540	2680	-	-	400	30
Trübung FTU		-	-	30	110	155	110	0
Sauerstoff mg/l		8,5	4,0	-	-	-	-	-
Ca mg/l		3200	152	126	-	-	-	-
Cr mg/l		0,02	-	-	-	-	-	-
Fe mg/l		0,12	0,5	> 2,5	-	> 2,5	> 2,5	0,7
Mg mg/l		1900	380	640	-	-	96	7,2
Mn mg/l		3,2	-	-	-	-	-	-
Cl (?) mg/l		17000	6850	-	-	-	-	-
HCO_3 mg/l		~1000	60	110	-	120	160	250

Tabelle 7.2: Analysenwerte

arbeiteten die Pumpen beim Probelauf unter simulierten Bedingungen störungsfrei.

- e.9) Beim Probelauf arbeitete die Niveauregelung störungsfrei, nachdem die Schwimmer beim ersten Absenken der Pilotanlage auf 550 m Tiefe mit 33 bar beaufschlagt worden waren. Der Schwimmer der Niveauanzeigeeinheit war dabei kollabiert.
- e.10) Beim zweiten Absenken der Anlage wurden bei 400 m Absenktiefe unzulässig geringe Isolationswerte zwischen den einzelnen Adern der Energieversorgungskabel gemessen, was auf einen Wassereintritt in die entsprechenden Steckverbindungen am Flansch (vgl. Abschnitt 6.2.3 und Bild 6.7) zurückzuführen ist.
- e.11) Messungen an der Entlüftungsleitung zum Erhalt von Aussagen über das Verhalten von Gasen beim submarinen Entsalzungsprozeß konnten durch den Ausfall der Fördereinheit nicht durchgeführt werden.

f) Schlußfolgerungen

- f.1) Der Funktionsnachweis für die submarine Umkehrosmose-
Meerwasserentsalzungs-technologie wurde prinzipiell erbracht.

Durch den technischen Defekt im Energieversorgungssystem der Pumpen konnte zwar nicht die kontinuierliche Förderung des in der Anlage produzierten entsalzten Wassers erreicht werden, doch die folgenden Punkte belegen die Funktion des Verfahrens:

- f.1.1) Die Füllhöhe im Produktwassersammler, die bei den Meßpunkten vor dem Absenken sowie in 100 und 200 m Tiefe 1 % betrug, war bei 300 m Absenktiefe auf 60 % gestiegen, entsprechend einem Zulauf von 150 l in 20 Minuten. Beim Meßpunkt in 400 m Tiefe

waren der Produktwassersammler und die Entlüftungsleitung auf einer Länge von circa 190 m gefüllt. Diese durch die Membranen permeierte Wassermenge entspricht der Permeatmenge, die ausgehend von den Leistungsdaten des Modulherstellers für die Produktion erwartet werden kann, wenn folgende Punkte berücksichtigt und in die Berechnung einbezogen werden:

- mit der Tiefe abnehmende Temperatur des Meerwassers am Versuchsort;
- mit der Tiefe zunehmende wirksame Druckdifferenz in Abhängigkeit von der Absenkgeschwindigkeit;
- mit zunehmender Absenkteilzeit abnehmende Differenz zwischen dem der Absenktiefe entsprechenden Außendruck und dem Innendruck im Produktwassersammler, der durch das Ansteigen der Wassersäule in der Entlüftungsleitung erhöht wird.

f.1.2) Die transmembrane Druckdifferenz, d.h. die Differenz zwischen dem der Absenktiefe entsprechenden hydrostatischen Druck des Meerwassers, hier mit Außendruck bezeichnet, vor der Membran und dem mit Innendruck bezeichneten Druck im Produktwassersammler bzw. hinter der Membran entsprach den theoretisch ermittelten Verhältnissen für den Füllvorgang der Anlage beim Absenken (vgl. Abschnitt 4.4 und Bild 7.14). Die für den osmotischen Gleichgewichtszustand registrierte Druckdifferenz von 22 bar, die unterhalb des mit circa 25 bar angegebenen osmotischen Druckes für Meerwasser mit 35.000 ppm Salzgehalt bei 25 °C liegt, ist auf einen höheren Salzgehalt im Permeat zurückzuführen (vgl. Punkt f.1.3), der unter Berücksichtigung der vorliegenden Temperaturverhältnisse und unter Beachtung möglicher Meßfehlerquellen mit einem Wert zwischen 4.000 und 5.000 ppm TDS angenommen werden kann.

f.1.3) Die mittels Leitfähigkeitsmessung ermittelten Werte für den Gesamtsalzgehalt der an verschiedenen Stellen der Anlage entnommenen Proben nach Bild 7.15 können ebenfalls zum Nachweis für den Entsalzungsprozeß herangezogen werden. Die gemessenen hohen Salzgehalte sind dabei auf mehrere Einflüsse zurückzuführen.

Verfahrensbedingte Einflüsse:

- Das beim Absenken der Pilotanlage zuerst in den Produktwassersammler fließende Permeat besaß einen höheren Salzgehalt als den, der bei normalem Betrieb der Anlage im Permeat zu erwarten ist. Dieser erhöhte Salzgehalt ist unter anderem dadurch verursacht, daß der Permeationsvorgang der im Meerwasser gelösten Salze durch eine Membran nur von der Differenz der Konzentration der gelösten Stoffe zu beiden Seiten der Membran abhängig ist [69, 88, 89]. Demgegenüber ist der Wasserfluß nur von der Druckdifferenz abhängig. Bei normalen Betriebsbedingungen, d.h. bei einer größeren wirksamen Druckdifferenz als der, die während der Absenkphase auf die Membranen wirkte, ist daher der Fluß des Lösungsmittels Wasser durch die Membran wesentlich höher und damit der Gesamtsalzgehalt insgesamt niedriger.
- Mit zunehmender Absenktiefe begann die Compaction-Phase bei den hier verwendeten, bisher nicht druckbeaufschlagten neuen Membranen. Zu Beginn dieser Compaction-Phase, mit der der reversible Vorgang des "Setzens" einer Membran bei Druckbelastung in den ersten Betriebsstunden bezeichnet wird [90], sind sowohl der Permeatfluß als auch der Salzfluß durch die Membranen höher als die

für den Normalbetrieb vom Hersteller angegebenen Werte.

- Aufgrund der in Forschungsarbeiten [69, 88, 90] theoretisch und experimentell ermittelten Erkenntnisse über die Transportvorgänge in und an Umkehrosmose-Membranen ist nachzuvollziehen, daß sich beim Permeationsvorgang während des Absenkens der Pilotanlage und während der Verweilzeit von 24 Stunden in 550 m Tiefe durch die fehlende erzwungene Anströmung in der Grenzschicht vor den Membranen eine Konzentrationserhöhung oder auch Konzentrationspolarisation ausgebildet hat. Diese Konzentrationspolarisation bewirkt zum einen eine Abnahme der wirksamen Druckdifferenz durch Ansteigen des osmotischen Druckes, zum anderen eine Vergrößerung der Salzpermeation durch die Membran wegen der sich einstellenden größeren Konzentrationsdifferenz. Beides zusammen führt zu einer Abnahme des Rückhaltevermögens.

Analysentechnische Einflüsse:

Da die Wasserproben in offiziellen Laboratorien analysiert werden sollten, war der an Bord befindliche Analysenkoffer nur für überschlägige Analysen des Permeats vorgesehen worden und entsprechend nur mit einem kleinen Meßbereich für die Leitfähigkeit ausgestattet. Die Analysenwerte nach Bild 7.15 müssen deshalb mit großem Vorbehalt betrachtet werden, da durch mehrfaches Verdünnen der Proben unter Verwendung kleinvolumiger Pipetten und Meßzylinder zur Angleichung der Salzgehalte an den Meßbereich des Leitfähigkeitsmeßgerätes Verdünnungsfehler in der Größenordnung von circa 10 bis 20 % berücksichtigt werden müssen.

Zur Erhöhung der Leitfähigkeit trugen Rostpartikel bei, die in einzelnen Proben in erheblichen Mengen festgestellt wurden. Die Anwesenheit nicht identifizierter salzartiger Partikel könnte ebenfalls eine Erhöhung der Leitfähigkeit bewirkt haben. Dies insbesondere, da eine Spülung der Anlage durch den Ausfall der Fördereinheit nicht erfolgen konnte und sich somit in den Proben Produktionsrückstände aus den Leitungen, oxydierter metallischer Oberflächenstaub und die Rückstände der Korrosionsvorgänge befanden, die unter anderem durch die reduzierenden Bestandteile in Schmiermittelresten in Verbindung mit Cloriden eingeleitet werden. Korrosionsgeschwindigkeitserhöhend wirkte dabei, daß sich das Wasser circa 4 Tage in der Anlage befand und durch die intensive Sonneneinstrahlung auf die eingeholte Anlage während zweier Tage Temperaturen von über 30 °C im Behälter erreicht wurden. Nach Erfahrungen aus der Praxis können die oben aufgezeigten Einflüsse die Leitfähigkeitsmessung dahingehend verfälschen, daß um circa 30 % höhere Werte gemessen werden.

- f.1.4) Ausgehend von der Tatsache, daß Pumpe 2 kurzfristig förderte und dabei in etwa die Wassermenge in die Produktpipeline drückte, die dem doppelten Füllvolumen der Produktwasserfördereinheit entspricht, wird angenommen, daß das Wasser der Probe Nr. 5 nach Bild 7.15 mit dem Permeat identisch ist, das sich anfänglich im Produktwassersammler befand. Unter Berücksichtigung der Erläuterungen nach Punkt f.1.3), wobei hierbei insbesondere die Meßfehlerquellen mit einzubeziehen sind, kann vermutet werden, daß der tatsächliche Gesamtsalzgehalt um circa die Hälfte unter dem vor Ort gemessenen Wert lag und damit in etwa dem Salzgehalt entspricht, der aufgrund der Messung der Differenz zwischen Außen- und Innendruck (Bild 7.14) bzw. gemäß der Angaben

nach Punkt f.1.2 festgestellt wurde, und der für den stationären Zustand in einer submarinen Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlage ohne Abpumpen des Permeats zu erwarten ist.

- f.2) Im Gegensatz zum Ergebnis der Kreislaufversuche hat sich die für die Druck- und Temperaturmessung installierte Meßtechnik beim Offshoreversuch nicht in allen Punkten erwartungsgemäß bewährt. Induktive Einflüsse und Kapazitätsveränderungen in den Meßleitungen durch die auf der Trommel über- und nebeneinander liegenden Schleifen des Unterwasserkabels, einzelne Transportschäden sowie die Auswirkungen der hohen Luftfeuchtigkeit und der teilweise hohen Temperaturen auf das Meßsystem sind dabei nicht auszuschließen.
- f.3) Die Verdrillungsüberwachungsvorrichtung, die zur Klärung einer bislang unbeantworteten Fragestellung entwickelt wurde, arbeitete störungsfrei. Der Einsatz dieses Systems für die Lösung ähnlicher Probleme in der allgemeinen Meeresforschung und -technik ist denkbar.
- f.4) Die Meßergebnisse der Verdrillungsüberwachungsvorrichtung zeigen, daß unter den beim Versuch herrschenden Bedingungen und unter den dabei aufgetretenen Belastungsverhältnissen ein doppelt armiertes Unterwasserkabel als einsträngiges Hebezeug geeignet ist.
- f.5) Das Konzept der Absenkvorrichtung und der zugehörigen Handhabung der Anlage und der Leitungen beim Absenken und Aufholen hat sich bewährt.

- f.6) Die an vorher nicht getesteten Komponenten beim Offshoreversuch festgestellten Mängel bestärken die Meinung, daß jedes Teil für eine submarine Anlage trotz der Absicherung der Anforderungen durch technische Angaben des Herstellers einer strengen Kontrolle unterzogen werden muß, da auch bei detaillierter Vorarbeit durch den Besteller Fehllieferungen nicht ausgeschlossen werden können.
- f.7) Die an der Pilotanlage verwendeten Dichtungssysteme haben sich bewährt.
- f.8) Durch den Ausfall der Fördereinheit entfiel die Möglichkeit die Meßwerte zu erfassen, die zum Nachweis der Wirtschaftlichkeit des Verfahens hätten herangezogen werden können. Da jedoch sowohl bei den Kreislaufversuchen als auch bei den Probelaufen die Arbeitsbedingungen für die Pumpen unter submarinen Bedingungen durch Drosseln des Förderstromes und einen entsprechenden Gegendruck von 60 bar simuliert wurden, können diese Werte hier übernommen werden. Der registrierte Weg für den spezifischen Energiebedarf von $3,2 \text{ kWh/m}^3$ wäre auch hier zu erwarten gewesen. Unter Berücksichtigung des Pumpenwirkungsgrades der in die Pilotanlage eingebauten Pumpen von circa 33 % und unter Beachtung der Tatsache, daß der Wirkungsgrad bei Pumpen mit höheren Förderleistungen bei circa 60 bis 75 % liegt, kann für submarine Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlagen mit Leistungen im Bereich von 1.000 bis $6.000 \text{ m}^3/\text{d}$ mit einem noch günstigeren spezifischen Energieverbrauch gerechnet werden.

Ausblick

Die oben beschriebenen Untersuchungen und Versuche haben gezeigt, daß das Verfahren der submarinen Umkehrosmose-Meerwasserentsalzung technisch realisiert werden kann.

Wie bei jedem neuen technischen Verfahren ist die Entwicklung von einer labormäßigen Anlage bis zur kommerziellen Großanlage nur über mehrere Entwicklungsstufen möglich. Die Durchführung einer ersten Entwicklungsstufe, in deren Verlauf die Funktion des Verfahrens unter realen Bedingungen bewiesen und Unterlagen für die wirtschaftliche Bewertung gewonnen werden konnten, ist in der vorliegenden Arbeit beschrieben.

Eine abschließende Beurteilung aller Ergebnisse macht deutlich, daß zwar eine Reihe noch ausstehender technischer bzw. technologischer Fragestellungen der Klärung bedürfen; sie zeigt aber gleichzeitig, daß diese Probleme nach dem heutigen Stand der Technik beherrschbar sind.

Bei der wirtschaftlichen Bewertung bleibt die Frage offen, in welchem Zyklus die Membranen wegen des Fouling oder anderer bisher nicht abschätzbarer Einflüsse gewechselt werden müssen. Darüber kann aber nur eine Betriebsanlage die letzte Klarheit bringen. Durch diese Unsicherheit wird jedoch die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens grundsätzlich nicht in Frage gestellt. Da für mit aufbereitetem Meerwasser beaufschlagte Umkehrosmose-Membranen Standzeiten von drei Jahren nachgewiesen wurden und inzwischen von einzelnen Membran-Herstellern garantiert werden, liegen die in der Wirtschaftlichkeitsanalyse nach Abschnitt 3 für die Standzeiten angenommenen Werte von 1, 1 1/2 und 2 Jahren auf der sicheren Seite.

Die sowohl auf Kostenstudien als auch auf praktisch ermittelte Kosten gestützte wirtschaftliche Bewertung läßt den Schluß zu, daß die Meerwasserentsalzung in submarinen Umkehrosmose-Anlagen ein wirtschaftliches und kostengünstiges Verfahren zur Gewinnung von Süßwasser aus Meerwasser ist.

Zusammenfassung

Ausgehend von den Ergebnissen einer Untersuchung über den Wasserverbrauch und die weltweite Wasserbedarfsentwicklung wird die Gewinnung von Süßwasser aus salzhaltigem Wasser, insbesondere aus Meerwasser, als einzige Möglichkeit zur großtechnischen Ergänzung und Substitution fehlender natürlicher Trinkwasservorräte erörtert. Die gegenwärtig eingesetzten Meerwasserentsalzungsverfahren werden kurz beschrieben und miteinander verglichen. Eine Reihe von prozeß- und anlagentechnischen Besonderheiten werden aufgezeigt, die für das Verfahren der Umkehrosmose sprechen, das sich unter anderem durch einen geringen spezifischen Energiebedarf auszeichnet.

Als eine Möglichkeit zur weiteren Senkung des spezifischen Energiebedarfes gegenüber konventionellen Landanlagen wird die Anwendung der Umkehrosmose in unter dem Meeresspiegel angeordneten Anlagen vorgeschlagen. Bei diesen submarinen Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlagen wird von dem Grundgedanken ausgegangen, den hydrostatischen Druck in Meerestiefen zwischen 500 und 1.000 m als Prozeßdruck zu benutzen. Dadurch beschränkt sich die erforderliche Energie auf die Förderung des in der Anlage entsalzten Wassers und gegebenenfalls auf einen geringen Bedarf zur Erzeugung einer Zwangsanströmung der Membranen.

Für verschiedene Anlagenkonzepte werden die mit Hilfe von Rechenprogrammen, die auf den Ergebnissen einer Systemanalyse basieren, ermittelten Wassergestehungskosten diskutiert. Diese lassen bereits Einzelanlagen kleinerer Kapazität attraktiv erscheinen und bestätigen die submarine Entsalzungstechnologie als eine Alternative zu den konventionellen Entsalzungsverfahren.

Die technische Realisierung submariner Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlagen wird an Beispielen aufgezeigt, wobei

in die Konzeption Erfahrungen der modernen Offshore-Technik, Möglichkeiten der Verlegetechnik von Seekabeln und submarinen Rohrleitungen und neueste technische Entwicklungen auf angrenzenden Gebieten einbezogen werden. Begleitend zur Konzeptphase wird untersucht, in wieweit sich handelsübliche Apparateelemente und Armaturen als Komponenten für diese submarinen Anlagen verwenden lassen. Die Entwicklung einzelner Komponenten wird erläutert.

Basierend auf den theoretischen Ausführungen werden die Konstruktion einer Pilotanlage nach methodischen Gesichtspunkten, die Auswahl und die Prüfungen an den bei der Fertigung verwendeten Komponenten beschrieben.

Die Ergebnisse der mit der Pilotanlage unter simulierten und bei einem Offshoreversuch unter realen Bedingungen durchgeführten Untersuchungen und Funktionstests sowie deren Logistik werden diskutiert. Die Gesamtbeurteilung ergibt, daß die Gewinnung von Süßwasser aus Meerwasser in submarinen Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlagen ein wirtschaftliches und kostengünstiges Verfahren ist.

L i t e r a t u r

- [1] Janczewski, H.: Demand for Water in Towns in the Years 1969 to 1990. Actual Situation. Tendency of Changes. Prognoses. International Water Supply Congress. Brighton (1974) Q1-Q8
- [2] Clodius, S.: Wasser für Bevölkerung und Wirtschaft in den nächsten dreißig Jahren. Gutachten für das Bundesministerium für Gesundheitswesen, Bad Godesberg (1969)
- [3] Wasserbedarfsentwicklung in Industrie, Haushalten, Gewerbe, öffentlichen Einrichtungen und Landwirtschaft. Prognose des Wasserbedarfes in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2000. Bericht des Batelle-Instituts e.V., Frankfurt am Main, für das Bundesministerium des Inneren, Bonn (1973)
- [4] Naturstoff Wasser. Vereinigung Deutscher Gewässerschutz e.V. VDG-Schriftenreihe Nr. 37, Bonn (1978)
- [5] Koske, P.H.: Meerwasserentsalzung - Grundlagen und Anwendungen. Jahresbericht 1975. Gesellschaft für Kernenergieverwertung im Schiffbau und Schifffahrt mbH., Geesthacht (1976)
- [6] Oehler, K.: Umweltkonflikte, gwf - wasser/abwasser 118 (1977) 11, S. 532-537
- [7] Klapp, E. u. Th. Peters: Trinkwasserbedarf und Entsalzung von Meerwasser, dargestellt an den Verhältnissen im Nahen Osten. Collegium Alexandrium der Universität Erlangen-Nürnberg (1978)

- [8] Oebius, H.: Meerestechnik in der Bundesrepublik Deutschland. Zusammenfassende Darstellung der Voraussetzungen und Aktivitäten. Deutsches Komitee für Meeresforschung und Meerestechnik e.V., Hamburg (1977)
- [9] Al-Gholsikah, A. and N. El-Ramley, I. Jamjoom, R. Seaton: The World's First Large Seawater Reverse Osmosis Desalination Plant at Jeddah, Kingdom of Saudi Arabia. National Water Supply Improvement Association Journal, Ipswich (1979)
- [10] Peters, Th. und G. van Opbergen: Stand der Entsalzungstechnik in Nahost - aufgezeigt am Beispiel einiger Golfstaaten. DECHEMA-Arbeitsausschuß "Industrielle Gewinnung von Süßwasser aus dem Meer" (1978)
- [11] Azhari, N.: Untersuchungen der Thermischen Meerwasserentsalzung unter besonderer Berücksichtigung von Verbesserungsmöglichkeiten ihrer Wirtschaftlichkeit. Diss. RWTH Aachen (197
- [12] Die Wasserversorgung in der chemischen Industrie. Verband der Chemischen Industrie e.V., Frankfurt am Main (1978'
- [13] Victor, H. et. al.: Meerestechnologie. Verlag Karl Thiemeig München (1973)
- [14] Hauser, H.: Süßwasser aus Salzwasser - Entsalzung von Meer- und Brackwasser. UMSCHAU 77 (1977) 9, S. 267-273

- [15] Fischbeck, K.: Die industrielle Herstellung von Süßwasser aus dem Meer. 1. Mitteilung. Chemiker-Zt./Chem. Apparatur, 88 (1964) 5, S. 163-168
- [16] Klapp, E.: Die Rolle des Apparatebaues bei der Erschließung neuer Rohstoff- und Energiequellen. Chemie-Ing.-Techn. 45 (1973) 19, S. 1155-1163
- [17] Klapp, E.: Grenzen des Wachstums - Alternativen bei Rohstoffen und Erzeugnissen? Verfahrenstechnik 10 (1976) 6
- [18] Drude, B.C.: Großtechnische Meerwasserentsalzung mit Hilfe der Kernenergie. Technische Mitteilungen, 63 (1970), 2, S. 81-86
- [19] Peters, Th.: Gewinnung von Süßwasser aus verunreinigtem und salzhaltigem Wasser nach dem Prinzip der umgekehrten Osmose. Josef van Opbergen, Neuss, und Lehrstuhl für Apparatechnik und Anlagenbau, Erlangen (1977)
- [20] Nace, R.: US Geological Survey
- [21] Konzeptvorschläge für die Öffnung eines deutschen Marktzutritts auf dem Gebiete der Seewasserverdampfungsanlagen. Interne Studie der Lohmeyer International GmbH für das Bundesministerium für Forschung und Technologie. Frankfurt am Main (1975)

- [22] Peters, Th.: Meerwasserentsalzung - Verfahren und Anlagenbeispiele. VDI - Arbeitskreis "Konstruktion und Entwicklung". Nürnberg (1979)
- [23] Hohenhinnebusch, W.: Über die Umwandlung von Salzwasser in Süßwasser. Techn. Mitt. Krupp Werksberichte, 23 (1965) 1, S. 33-41
- [24] Fischbeck, K.: Die industrielle Herstellung von Süßwasser aus dem Meer. 3. Mitteilung: Verdampfungsverfahren. Chemiker-Ztg./Chem. Apparatur 88 (1964) 12, S. 433-444
- [25] Gmelin Handbuch der Anorganischen Chemie. Sauerstoff Anhangband Water Desalting. 8. Aufl. Springer Verlag, Berlin (1974)
- [26] Dornier, Firmenprospekt
- [27] Fischbeck, K.: Die industrielle Herstellung von Süßwasser aus dem Meer. 5. Mitteilung: Verdunsten im Sonnenlicht. Chemiker-Ztg./Chem. Apparatur 88 (1964) 19, S. 741-748
- [28] Spiegler, K.S.: Principles of Desalination. Academic Press, London (1966)
- [29] Rautenbach, R. und Hoeck, H.: Die Gewinnung von Süßwasser aus dem Meer - gegenwärtiger Stand und Entwicklungstendenzen. Chemie-Ing.-Techn. 44 (1972) 20, S. 1145-1151
- [30] Schneider, W., K. Seidelmann und K.H. Ebert: Laboratory experiments of ha hydrate process in a column apparatus. Proc. 6 th. Int. Symp. Fresh Water from the Sea. 4 (1978) S. 53-61

- [31] Hattenbach, K. und K. Kneifel: Eine Pilot-Elektrodialyseanlage für die Entsalzung von Brunnenwasser. Proc. 6th. Int. Symp. on Fresh Water from the Sea, (1978) 3, S. 85-93
- [32] Eggersdorfer, R., H.J. Hampel and K.H. Scherer: Economic comparison of seawater desalination by electrodialysis at normal and elevated temperature. Proc. 6th. Int. Symp. on Fresh Water from the Sea, (1978) 3, S. 57-65
- [33] Hornburg, C.D., O.J. Morin and G.K. Hart: Commercial membrane desalting plants - data and analysis. Report for the Office of Water Research and Technology, U.S. Depart. of the Interior. Washington (1975)
- [34] Peter, S. and R. Stefan: Asymetric membranes for reverse osmosis made of PVA and its derivatives. Proc. 6th. Int. Symp. on Fresh Water from the Sea. (1978) 3, S. 239-246
- [35] Buckley, J.D.: Reverse osmosis - moving from theory to practice. Consulting Engineer, 45 (1975) 5, S. 55-61
- [36] Marquardt, K. und H. Ludwig: Entsalzung von Brack- und Meerwasser mit Umkehrosmose-Kompaktmoduln. Meerestechnik 8 (1977) 5, S. 163-168
- [37] Krueger, R.L., P. Regunathan: La osmosis invertida y las bebidas postmezcladas. El Embotellador (1973) 6, S. 6-14

- [38] Wangnick, K., W. Bockhorn and A. Weise: Medium and large scale reverse osmosis seawater desalination plants. VDI-Seminar "Seawater desalination and its Energy Supply", Teheran (1977)
- [39] Truby, R.: Reverse osmosis for boiler feedwater treatment. Power Engineering, 80 (1976) 12, S. 59-60
- [40] Nusbaum, I. and R.G. Sudak: Industrial applications of spiral-wound reverse osmosis moduls. Gulf Environmental Systems Company, San Diego (1975)
- [41] Riley, L. and J. Burnett: Technics for gas enrichment from cal sources - membrane technology Fluid Systems Division, VOP Inc., San Diego (1976)
- [42] Channabasappa, K.C.: Need for new and better membranes. Proc. 1st. Int. Chemical Congress, Mexico (1975)
- [43] Dytnerskij, J.I.: Membranprozesse zur Trennung flüssiger Gemische. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leibzig (1977)
- [44] Merten, U.: Desalination by reverse osmosis. M. I. T. Press, Cambridge, Massachussetts (1966)
- [45] Sourirajan, S.: Reverse osmosis and synthetic membranes. Theory - Technology - Engineering. National Research Council, Ottawa (1977)

- [46] Dietrich, G. und K. Kalle: Allgemeine Meereskunde -
Eine Einführung in die Ozeanographie.
3. Auflage, Gebrüder Borntraeger,
Berlin (1975)
- [47] Kunst, B.: Physico - economical asymptotes of desalination. Proc. 6th. Symp. on Fresh Water from the Sea, (1978) 1, S. 31-45
- [48] Böddeker, K.W.: Bericht über die Vortragsgruppen Umkehrosmose und Hohlfasern beim 6. Int. Symp. on Fresh Water from the Sea. DECHEMA - VDI - Arbeitsausschußsitzung, Taunusstein (1978)
- [49] Rautenbach, R. und K. Rauch: Ultrafiltration und Umkehrosmose - Grundlagen und technische Anwendungen. Verfahrenstechnik, 12 (1978) 5, S. 309-315
- [50] Roels, O.A. und D.F. Othmer: Power, fresh water and food cold, deep sea water. SCIENCE, 182 (1973) S. 121-125
- [51] Hampe, M.H., H. Wagner, E. Blass und B.C. Drude: Membrane performance under deepsea conditions. Proc. 5th. Int. Symp. on Fresh Water from the Sea, 4 (1976), S. 325-333
- [52] Shields, C.P.: Five year's experience with reverse osmosis systems using Du Pont "Permasep" permeaters. Proc. 6th. Int. Symp. on Fresh Water from the Sea, 3 (1978) S. 395-414

- [53] Climate aridity index map. United Nations conference on desertification. Nairobi (1977)
- [54] A standardized procedure for estimating the costs of saline water conversion.
Office of Saline Water, Washington D.C.
(1956)
- [55] Klapp, E. und Th. Peters: Submarine Anlagen zur Meerwasserentsalzung nach dem Prinzip der Umgekehrten Osmose - Stand der Entwicklung und Ausblick. Meerestechnik, 7 (1976) 5, S. 145-149
- [56] Peters, Th.: Vergleichende Literaturstudie über die Berechnung von Süßwassergewinnungsanlagen nach dem Prinzip der Umgekehrten Osmose. Interne Studie am Lehrstuhl für Apparatechnik und Anlagenbau, Erlangen (1976)
- [57] Diskussionsergebnisse der "Nachlese Las Palmas 1978".
DECHEMA/VDI-Arbeitsausschußsitzung,
Tausenstein, (1978)
- [58] Peters, Th.: Erfahrungen von Herstellern und Betreibern mit dem Verlegen von Kabeln und Kunststoffrohrleitungen in größeren Meerestiefen.
Interner Bericht am Lehrstuhl für Apparatechnik und Anlagenbau, Erlangen
(1977)
- [59] Todd, H.W.: U.S. patent No. 3.171.808 (Filed Nov. 1960)

- [60] Chapin, J.W. and J.S. Williams: U.S. patent No. 3.156.654
(Filed June 1962)
- [61] Carpenter, F.D.: U.S. patent No. 3.060.119 (Filed Oct.
1962)
- [62] Drude, B.C.: Submarine Units for Reverse Osmosis.
Proc. 2nd European Symp. on Fresh Water
from the Sea (1967)
- [63] Klapp, E.: Pipeline-Bau im Meer. Gas Wärme Internat.,
21 (1972) 5, S. 215-222
- [64] Drude, B.C. und E. Klapp: Submarine Units for Reverse
Osmosis. Proc. 4th. Int. Symp. on Fresh
Water from the Sea, 4 (1973) S. 125-134
- [65] Drude, B.C. und E. Klapp: Süßwassergewinnung im Rahmen
der Meerestechnik. 5. Aufbau-seminar
Meerestechnik, TU Clausthal 4 (1974)
- [66] Peters, Th.: Offshore Europe 75 - Das Nordseeöl im
Mittelpunkt. Chem.-Ing.-Techn. 48 (1976)
3, S. 148A-150A
- [67] Peters, Th., E. Klapp und B.C. Drude: Feasibility Study
on Submarine Units for Reverse Osmosis.
Proc. 5th. Int. Symp. on Fresh Water
from the Sea, 4 (1976) S. 365-375
- [68] Klapp, E. und Th. Peters: Systemanalyse submariner Ent-
salzungsanlagen nach dem Prinzip der Um-
gekehrten Osmose, Phase I. Forschungsbe-
richt des Lehrstuhls für Apparate-technik
und Anlagenbau der Universität Erlangen-
Nürnberg für das Bundesministerium für
Forschung und Technologie. Erlangen (1978)

- [⁻69_] Rautenbach, R. und R. Rauch: Ultrafiltration und Umkehrosmose - Grundlagen und Technologie, Chem.-Ing.-Techn. 49 (1977) 3, S. 223-231
- [⁻70_] Hese, N.: Die Herstellung von Membranen aus Polyvinylalkohol und dessen Derivaten für die Aufbereitung phenolhaltiger Wässer durch Umgekehrte Osmose. Diss. UNI Erlangen (1976)
- [⁻71_] Göhring, H.O.: Der Unterwassermotor und seine Anwendung in der Meerestechnik. InterOcean 76, Kongreß-Berichtswerk 1 (1976) S. 721-733
- [⁻72_] Benefeld, R., J. Beushausen, H. Victor und G. Werner: Energieversorgungssysteme zur Deckung des Leistungs- und Energiebedarfs in der Meerestechnik. Bericht Nr. 71/E/10 der Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt mbH. Geesthacht (1971)
- [⁻73_] Petersen, G. und M. Peltzer: Der integrierte Druckwasserreaktor als Energieversorgungssystem für die thermische Meerwasserentsalzung DECHEMA-Arbeitsausschuß "Industrielle Gewinnung von Süßwasser aus dem Meer". Arnoldshain (1976)
- [⁻74_] Diem, W.: Untersuchungen zur Entgasung und zu einem Entgasungssystem für eine submarine Umkehrosmose Meerwasserentsalzungsanlage. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Universität Erlangen-Nürnberg, 1979
- [⁻75_] Roels, A.: Artificial Upwelling Projekt. Lamont-Doherty Geological Observatory. U.S. Virgin Islands, St. Croix (1975)

- [76] Matteelli, R., F. Andreuzzi and F. Taddei: Sea-line laying in deep waters. Paper OTC 2677, Proc. Offshore Technology Conference, Houston (1976)
- [77] Clauss, G., C. Kruppa und E. Wolf: Parameterstudie über das Verlegen von Pipelines in größeren Meerestiefen. Proc. Interocean 76, Düsseldorf (1976) 1, S. 749-761
- [78] Abich, G.: Verankerung einer Navigationsboje (NAREF) für die Manganknollenexploration in Tiefseegewässern bei Hawaii. Proc. Interocean 76, Düsseldorf (1976) 1, S. 1023-1033
- [79] Vandiver, J. and C. Mazel: A field study of vortex excited vibrations of marine cables. Paper OTC 2491, Proc. Offshore Technology Conference, Houston (1976)
- [80] Strathmann, H. und H.-D. Saier: Entwicklung des Membranteiles einer submarinen Entsalzungsanlage. Studie im Auftrag des Instituts für Apparatetechnik und Anlagenbau. Institut Berghof, Tübingen (1975)
- [81] Momberg, W.: Entwicklung einer Submarine-Multikuppplung für submarine Entsalzungsanlagen nach dem Prinzip der Umgekehrten Osmose. Studie im Auftrag des Instituts für Apparatetechnik und Anlagenbau. Carl Kurt Walther GmbH & Co KG, Wuppertal (1976)

- [82] Hampe, M.: Untersuchung des Betriebsverhaltens semipermeabler Membranen zur submarinen Meerwasserentsalzung bei niedrigen Temperaturen. Forschungsbericht des Lehrstuhls für Verfahrenstechnik der Technischen Universität München für das Bundesministerium für Forschung und Technologie. München (1979)
- [83] Klapp, E.: Festigkeit im Apparate- und Anlagenbau. Werner-Verlag, Düsseldorf (1970)
- [84] AD-Merkblätter V.d.TÜV
Ausgabe Februar 1977
- [85] Buchter, H.: Apparate und Armaturen der Chemischen Hochdrucktechnik.
Springer-Verlag, Berlin (1976)
- [86] Vollbrecht, H.: Der geschlossene Hohlzylinder und die Hohlkugel unter Außendruck. Chemie-Technik 3 (1974) 9, S. 331-336
- [87] Mittelmeer-Handbuch Nr. 2027, 4. Auflage.
Deutsche Hydrographisches Institut,
Hamburg (1959)
- [88] Böddeker, K.: Grundlagen der osmotischen Wasserentsalzung. Angew. Chem. 89 (1977),
S. 624-630
- [89] Walch, A.: Reverse Osmose - Verfahren, Wirkungsmechanismus und Membranentwicklung. CZ-Chemie-Technik, 2 (1973) 1, S. 7-11
- [90] Rauch, K.: Umkehrosmose und Ultrafiltration als wirtschaftliche Verfahrensschritte - Untersuchungen am Beispiel der Meerwasserentsalzung und Molkeaufbereitung. Diss. RWTH-Aachen (1978)

Lebenslauf

Name	Thomas Peters
geb. am	31.03.1947
in	Berlin
Eltern	Albert Peters, Chemotechniker Liselotte Peters, geb. Schneider (verst. 1972)
1953	Flucht aus der sowj. Besatzungszone (Nächst-neuendorf, Kreis Teltow)
1953	Einschulung an der Evangelischen Volksschule Neuwerk in Mönchengladbach
1954	Übersiedlung nach Cervelló bei Barcelona, Spanien
1954 - 1966	Besuch der Deutschen Schule in Barcelona
14.06.1966	Abitur
1966 - 1967	Praktikantentätigkeit bei Fa. Proyecciones y Montajes Industriales, Barcelona
1967 - 1974	Studium des Maschinenbaus, Fachrichtung Verfahrenstechnik, Studienrichtung Apparatebau und Anlagentechnik an der TU Clausthal. Während des Studiums Praktikantentätigkeit bei Fa. Schmidding, Köln, und Fa. SWA Lithium Mines, Karibib, Südwestafrika
08.04.1974	Diplom-Ingenieur
15.04. - 31.10.1974	Planungsingenieur bei Fa. Tecnicfinanz S.A., Almeria
01.11.1974 - 31.12.1979	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Apparatechnik und Anlagenbau der Universität Erlangen-Nürnberg

